



TUGAS AKHIR – TL141584

**PENGARUH KOMPOSISI KROMIUM (Cr) TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN BAJA
PERKAKAS KECEPATAN TINGGI AISI M10 MELALUI
METODE PENGECORAN**

Hafidh Frian Perdana
NRP 2712 100 015

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016

(halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL141584

**EFFECTS OF CHROMIUM (Cr) COMPOSITION ON
MICROSTRUCTURE AND HARDNESS AISI M10 HIGH
SPEED STEEL THROUGH CASTING METHOD**

Hafidh Frian Perdana
NRP 2712 100 015

ADVISOR

Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

Department of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016

(halaman ini sengaja dikosongkan)

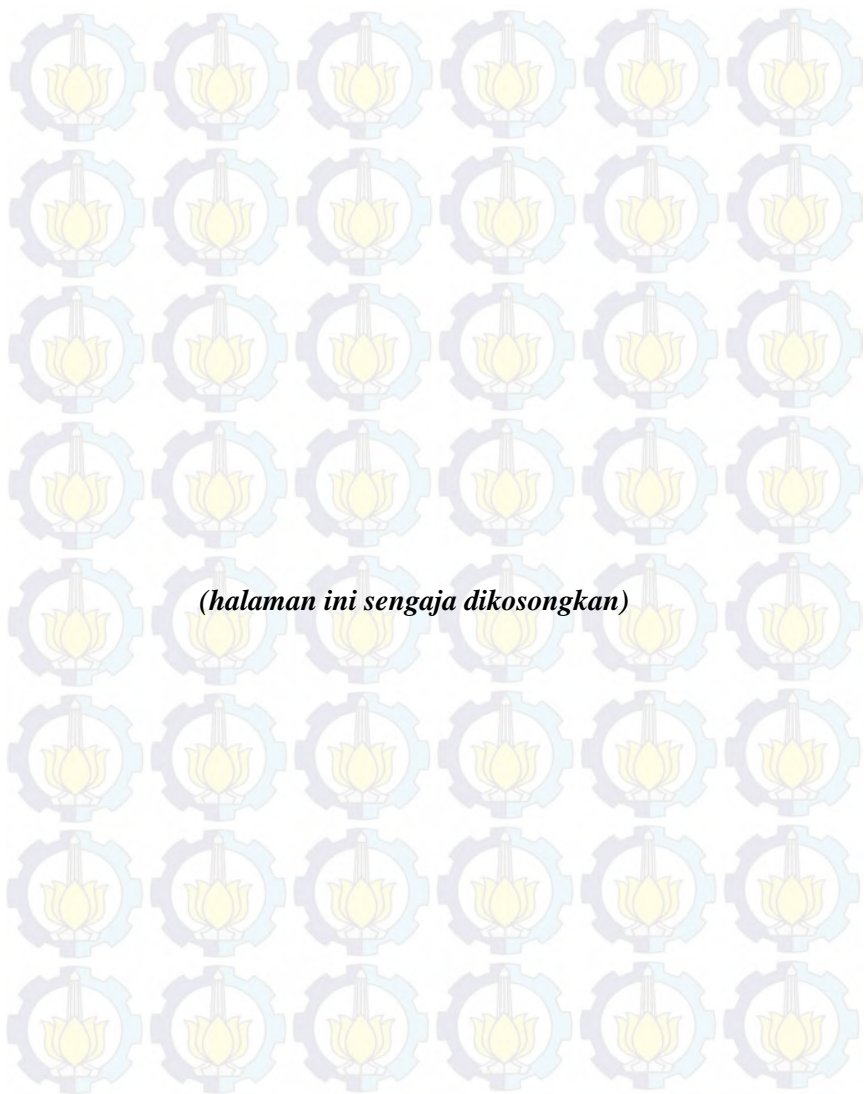
Pengaruh Komposisi Kromium (Cr) terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Baja Perkakas Kecepatan Tinggi AISI M10 melalui Metode Pengecoran

Nama : Hafidh Frian Perdana
NRP : 2712100015
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing : Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, S.T., M.Sc.
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

Abstrak

Baja perkakas kecepatan tinggi AISI M10 adalah baja paduan Fe-Mo-V-Cr dengan kadar 8% berat Mo, 4% berat Cr, 2% berat V, dan 0,85% berat C. Baja perkakas ini memiliki sifat keras pada temperatur tinggi (*hot hardness*) sehingga mampu menahan pelunakan (*tempering*) pada laju potong yang tinggi. Sifat *hot hardness* dapat dimiliki paduan dengan struktur mikro yang tersusun atas sejumlah besar karbida dalam matriks yang dapat dikeraskan. Kromium mampu meningkatkan sifat mekanik baja paduan Fe-Mo-V-Cr. Pada penelitian ini, variasi komposisi kromium (Cr) sebesar 2, 4, 6, 8% berat pada AISI M10 paduan Fe-Mo-V-Cr dilakukan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap struktur mikro dan kekerasan paduan. Fe-C, ferrochrome, ferromolybden, ferrovanadium, dan karbon dimasukkan ke dalam *Electric Arc Furnace* dengan elektroda grafit pada temperatur 1900°C selama 120 detik. Spesimen paduan Fe-Mo-V-Cr dikarakterisasi dengan *Optical Emission Spectroscopy* (OES), uji kekerasan, uji metalografi, dan *X-Ray Diffraction* (XRD). Struktur mikro hasil coran paduan menunjukkan keberadaan sementit, karbida $(\text{Fe,Mo})_{23}\text{C}_6$, dan karbida $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ dalam matriks αFe . Penambahan kromium pada paduan Fe-Mo-V-Cr menyebabkan nilai kekerasan meningkat karena terjadi mekanisme *solid solution hardening* dan pembentukan karbida. Paduan Nilai kekerasan tertinggi sebesar 53 HRC terdapat pada paduan Fe-8Mo-2V-8Cr.

Kata kunci : Fe-Mo-V-Cr, Kromium, Karbida Logam, Kekerasan



Effect of Chromium (Cr) Composition on Microstructure and Hardness AISI M10 High Speed Steel through Casting Method

Name : Hafidh Frian Perdana
NRP : 2712100015
Department : Materials and Metallurgical Engineering
Advisor : Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

Abstract

AISI M10 high speed steel (HSS) is Fe-Mo-V-Cr alloy which has 8%wt Mo, 4%wt Cr, 2%wt V, and 0.85%wt C. This tool steel has ability to maintain high hardness at elevated temperatures (hot hardness) so it can resist softening due to tempering at high cutting speed. Good hot hardness property depends on microstructures that consist of great amount carbide in hardenable matrix. Chromium was added to improve mechanical properties in Fe-Mo-V-Cr alloy. In this work, influence of chromium composition (2, 4, 6, 8% wt) on microstructure and hardness of M10 HSS was studied. Fe-C, Fe-Cr, Fe-Mo, Fe-V, and C was melted in Electric Arc Furnace with graphite electrode at 1900°C during 120 s. The cast alloys were characterized using Optical Emission Spectroscopy (OES), hardness test, metallography, and X-Ray Diffraction (XRD). Microstructure of M10 HSS as cast showed cementite, $(Fe,Mo)_{23}C_6$ carbide, $(Fe,Cr)_{23}C_6$ carbide in ferrite matrix. Chrome addition on Fe-Mo-V-Cr increases Cr composition that can improve hardness through solid solution hardening and carbide forming mechanism. Fe-8Mo-2V-8Cr alloy has the highest hardness which the value is 53 HRC.

Keywords : Fe-Mo-V-Cr, Chromium, Metal Carbide, Hardness



**PENGARUH KOMPOSISI KROMIUM (Cr) TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN BAJA
PERKAKAS KECEPATAN TINGGI AISI M10 MELALUI
METODE PENGECORAN**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Bidang Studi Metalurgi Manufaktur
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

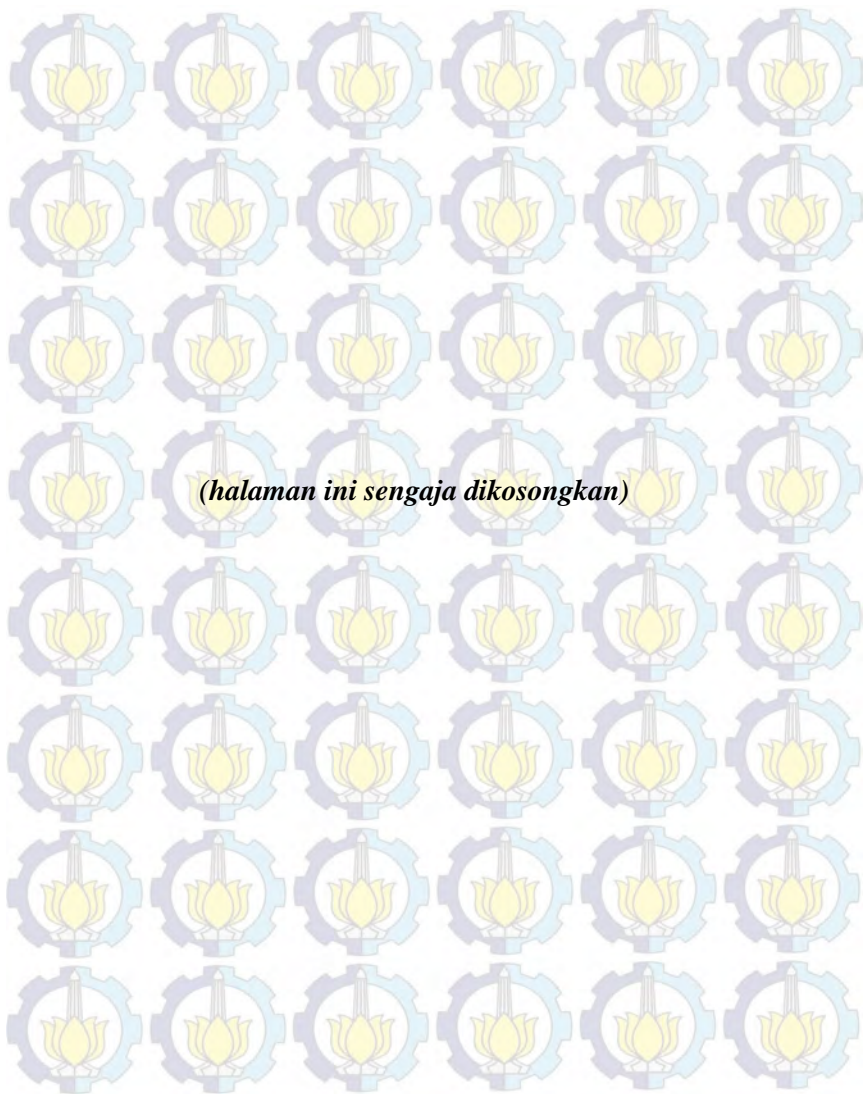
Oleh :

HAFIDH FRIAN PERDANA
NRP 2712100015

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Eng. Hosta Ardhyana, S.T., M.Sc..... (Pembimbing 1)
2. Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc..... (Pembimbing 2)





KATA PENGANTAR

Proses manufaktur, pembentukan, dan pengolahan raw material menjadi barang yang berdaya guna tidak akan dapat berkembang pesat tanpa peralatan perkakas. Di Indonesia, usaha untuk memproduksi peralatan perkakas sangat minim. Berangkat dari itu, penulis melakukan riset tentang baja perkakas.

Alhamdulillah, segala puji dan syukur hanyalah milik Allah, Tuhan Semesta Alam yang telah memberikan penulis limpahan rahmat untuk menyelesaikan laporan Tugas Akhir tentang analisis pengaruh unsur paduan terhadap sifat fisik dan mekanik baja perkakas kecepatan tinggi AISI M10 melalui metode pengecoran.

Penulis mengucapkan terima kasih spesial kepada:

1. Allah SWT yang selalu mencurahkan rahmat, anugerah, dan karunia kepada penulis untuk dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini
2. Ayah dan ibu kedua orang tua penulis, serta adik penulis yang selalu mendoakan dan memberi dorongan motivasi selama ini
3. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc dan Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir, yang telah memberikan arahan, bimbingan dan masukan kepada penulis
4. Pak Anto, Pak Chanan, Pak Tari, Mas Ridho, Mas Asman, Pak Marsono, Dayu Syarifah, Mega Lazuardi selaku mentor selama perjalanan penelitian Tugas Akhir
5. Rekan satu tim Imam Syafiudin, Ali Yafi, Huffal Azhar Fadly, dan Marvin Suganda atas semua kerjasamanya
6. Mas Paiman, Pak Hartono, dan Mbak Iis yang telah membantu dalam penyediaan alat, preparasi bahan dan spesimen, serta pengambilan data.
7. Keluarga laboratorium Inovatif yang memberikan atmosfer penelitian yang kuat
8. Seluruh kolega angkatan 2012 yang selalu saling menguatkan dalam bingkai keriang.

9. Dan seluruh pihak yang tidak dapat ditulis satu persatu disini yang telah memberikan kontribusi atas penulisan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kekurangan di berbagai sudutnya. Namun, dengan tulus penulis berharap bahwa laporan ini dapat bermanfaat bagi semua orang.

Surabaya, Desember 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	vii
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja	5
2.2 Pengaruh Unsur Paduan	8
2.3 Kromium	10
2.4 Paduan Fe-Cr-C	11
2.5 Perkakas Potong (<i>Cutting Tools</i>)	15
2.6 Baja Perkakas.....	19
2.7 Baja Kecepatan Tinggi (HSS).....	21
2.8 Struktur Mikro HSS	22
2.9 Pengecoran.....	26
2.9.1 Sand Casting	28
2.9.2 Solidifikasi	30
2.9.3 Penyusutan dan Toleransinya	31
2.9.4 <i>Finishing</i> dan Inspeksi	28
2.9.5 Cacat dalam Pengecoran.....	30
2.9.6 <i>Furnace</i>	28

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian	39
3.2 Material	40
3.3 Alat.....	40
3.4 Variabel Penelitian.....	44
3.5 Tahapan Penelitian.....	46
3.6 Karakterisasi.....	45
3.6.1 Pengujian OES.....	45
3.6.2 Pengujian Metalografi.....	46
3.6.3 Pengujian Kekerasan.....	47
3.6.4 Pengujian XRD	48
3.5 Rancangan Penelitian.....	50

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Paduan Fe-Mo-V-Cr	51
4.2 Komposisi Kimia Paduan Fe-Mo-V-Cr	52
4.3 Pengamatan Hasil XRD Paduan Fe-Mo-V-Cr ...	55
4.4 Pengamatan Struktur Mikro Coran	58
4.5 Nilai Kekerasan Paduan Fe-Mo-V-Cr.....	64

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	68
5.2 Saran	69

DAFTAR PUSTAKA	xix
-----------------------------	------------

LAMPIRAN	xxi
-----------------------	------------

BIOGRAFI PENULIS.....	xlii
------------------------------	-------------

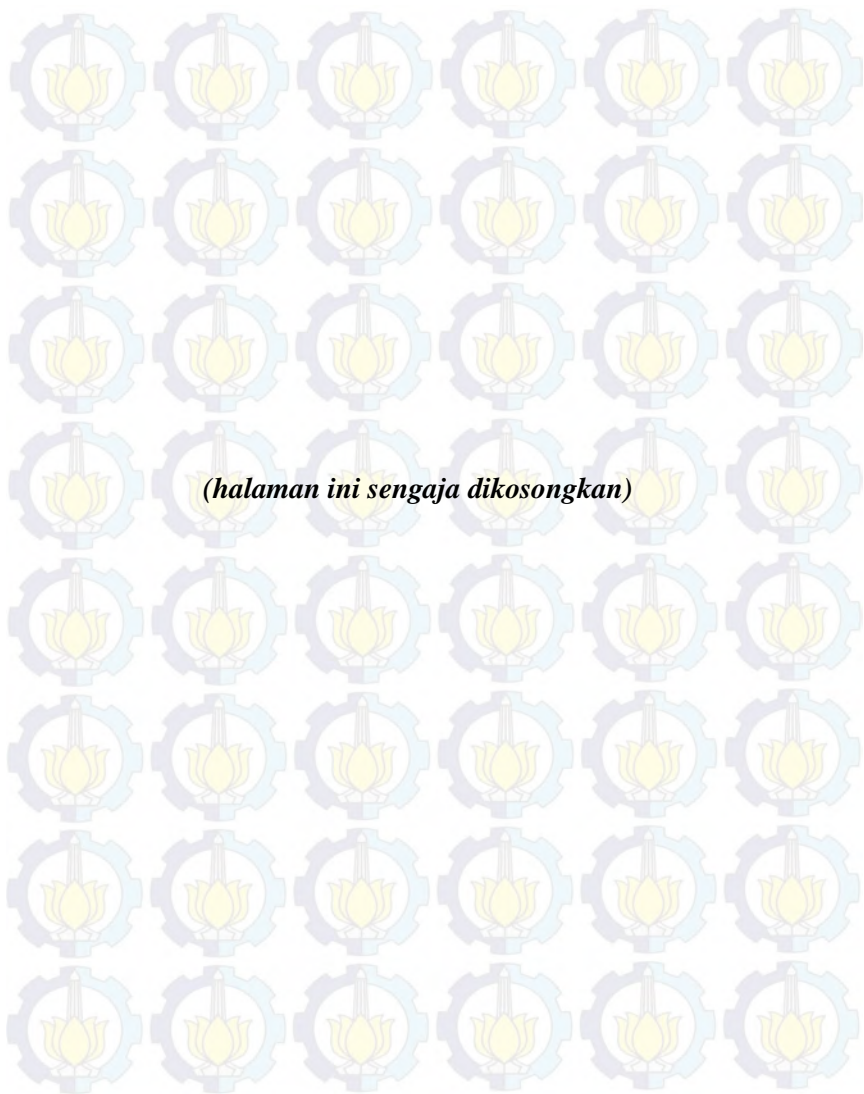
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram Fasa Fe-Fe ₃ C.....	6
Gambar 2.2	Pengaruh unsur paduan dalam ferit	10
Gambar 2.3	Diagram kesetimbangan Fe-Cr.....	12
Gambar 2.4	Potongan isothermal diagram fasa ternary Fe-Cr-C pada temperature 1000.....	13
Gambar 2.5	Potongan isothermal sistem Fe-Cr-C pada temperatur 870 dengan komposisi karbon dan krom berbeda.....	14
Gambar 2.6	Efek kromium sebagai material paduan.....	18
Gambar 2.7	Nilai kekerasan materai perkakas dalam fungsi temperatur	16
Gambar 2.8	Material perkakas sesuai dengan aplikasi permesinan.....	17
Gambar 2.9	Struktur mikro baja perkakas kecepatan tinggi AISI M2 pada berbagai kondisi	23
Gambar 2.10	Struktur mikro HSS M2 kondisi annealed perbesaran 200x dengan berbagai etsa.....	24
Gambar 2.11	Karbida eutektik, herringbone, dan feathery pada baja perkakas AISI M2	24
Gambar 2.12	Ilustrasi bagian cetakan pasir.....	29
Gambar 2.13	Ilustrasi struktur hasil coran dalam cetakan balok pada berbagai jenis material	30
Gambar 2.14	Beberapa cacat pada hasil coran	35
Gambar 2.15	Tipe tungku krusibel.....	36
Gambar 2.16	Ilustrasi tungku induksi	37
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	39
Gambar 3.2	Dimensi tampak depan Electric Arc Furnace	41
Gambar 3.3	Mesin <i>Electric Arc Furnace</i>	41
Gambar 3.4	Mikroskop optik	42
Gambar 3.5	Alat uji kekerasan	43
Gambar 3.6	Mesin XRD.....	44
Gambar 3.7	Skema ilustrasi OES	46

Gambar 3.8	Prinsip kerja mikroskop optik.....	38
Gambar 3.9	Ilustrasi pengujian kekerasan Rockwell C dengan indenter intan	48
Gambar 3.10	Skema ilustrasi XRD	49
Gambar 4.1	Hasil coran paduan Fe-Mo-V-Cr dengan variasi kadar Cr (a) 2 (b) 4 (c) 6 (d) 8 % berat	52
Gambar 4.2	Perbandingan hasil XRD berdasarkan kadar kromium dalam paduan Fe-Mo-V-Cr	55
Gambar 4.3	Perbandingan hasil XRD berdasarkan kadar karbon dalam paduan Fe-Mo-V-Cr	57
Gambar 4.4	Struktur mikro paduan Fe-8Mo-2V-2Cr Perbesaran (a) 500 (b) 1000 kali	59
Gambar 4.5	Struktur mikro paduan Fe-8Mo-2V-4Cr Perbesaran (a) 500 (b) 1000 kali	61
Gambar 4.6	Struktur mikro paduan Fe-8Mo-2V-6Cr Perbesaran (a) 500 (b) 1000 kali	62
Gambar 4.7	Struktur mikro paduan Fe-8Mo-2V-8Cr Perbesaran (a) 500 (b) 1000 kali	63
Gambar 4.8	Nilai kekerasan	65

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Spesifikasi baja karbon tinggi.....	8
Tabel 2.2	Sifat fisik kromium.....	11
Tabel 2.3	Klasifikasi baja perkakas	20
Tabel 2.4	Komposisi kimia beberapa tipe baja perkakas kecepatan tinggi yang umum	22
Tabel 2.5	Toleransi penyusutan logam yang dicor dalam cetakan pasir	32
Tabel 2.6	Furnace peleburan logam.....	36
Tabel 3.1	Rancangan penelitian	50
Tabel 4.1	Komposisi kimia paduan Fe-Mo-V-Cr	52
Tabel 4.2	Massa bahan lebur	53
Tabel 4.3	Komposisi kimia baja kecepatan tinggi AISI M10 berdasarkan ASTM A600	54
Tabel 4.4	Nilai Kekerasan Paduan Fe-Mo-V-Cr	64



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja merupakan paduan antara besi (Fe) dan karbon (C) dengan kadar karbon kurang dari 2%. Berdasarkan komposisi kimia, baja digolongkan menjadi dua kelompok, yaitu: baja karbon (baja karbon tanpa paduan, *plain carbon steel*) dan baja paduan. Baja paduan mengandung karbon dan jumlah mangan, silikon, tembaga, fosfor, dan sulfur yang terbatas dengan penambahan unsur paduan, seperti: Al, Cr, Co, Nb, Mo, Ni, Ti, W, V, Zr, dsb. Baja paduan banyak digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan sifat khusus, misalnya: baja tahan karat dan baja perkakas (Krauss. 2005).

Baja perkakas (*tool steel*) adalah baja karbon atau baja paduan yang dapat dikeraskan sehingga dapat digunakan untuk memotong atau meraut material lain. Baja ini banyak digunakan untuk material perkakas tangan, seperti gunting, palu, dan gergaji, serta *dies* untuk proses *forming* dan *blanking*. Aplikasi baja perkakas sangat luas karena memiliki sifat tahan aus, kekerasan, dan ketangguhan yang baik. Performa baja perkakas sangat bergantung pada kadar karbon, unsur paduan, dan proses perlakuan panas (Robert. 1998).

Material peralatan potong (*cutting tool*) yang telah digunakan sejak ratusan lalu adalah baja karbon. Baja karbon yang dipakai tergolong jenis baja karbon tinggi dengan kandungan karbon 0,60 – 1,4%. Kadar karbon yang tinggi memungkinkan baja dapat dikeraskan melalui perlakuan panas menghasilkan sifat tahan aus yang tinggi. Setelah dikeraskan melalui *oil quenching* dan *tempering*, baja ini memiliki kekuatan tarik antara 760 – 1280 MPa, kekuatan luluh 510 – 830 MPa, dan elongasi 10%. Namun, temperatur operasional baja perkakas berbasis karbon relatif rendah (dibawah 300°C) karena terjadi pelunakan pada temperatur yang lebih tinggi. Saat ini, baja karbon perkakas jarang

digunakan kecuali untuk keperluan pisau, pahat, dan gergaji kayu (Callister. 2010).

Baja perkakas kualitas tinggi dengan kecepatan potong dan kekerasan pada temperatur tinggi (*hot hardness*) perlu dikembangkan. Perbedaan baja perkakas kualitas tinggi dengan baja karbon adalah keberadaan unsur paduan yang membuat baja lebih keras dan kuat, serta lebih tahan terhadap panas. Unsur paduan yang sering digunakan, antara lain: mangan, krom, tungsten, vanadium, molibdenum, kobalt, dan niobium. Penambahan setiap unsur paduan bertujuan untuk mendapatkan sifat-sifat yang sesuai dengan keinginan, misalnya: kedalaman pengerasan, kekerasan temperatur tinggi, ketahanan aus, dan kekuatan (Davim. 2014).

Salah satu jenis baja perkakas adalah baja kecepatan tinggi (*high speed steel*) AISI seri M dan T yang berbasis molibdenum atau tungsten. Kemampuan baja menahan tempering pada temperatur tinggi adalah sifat utama dari baja perkakas kecepatan tinggi. Kekerasan baja ini setelah dikeraskan umumnya 64-66 HRC pada temperatur ruang, 52 HRC pada 540°C, dan 48 HRC pada 595°C. Fitur tersebut diperoleh karena keberadaan karbida yang tinggi dalam matriks yang telah dikeraskan. Baja perkakas AISI M10 pada dasarnya merupakan paduan Fe-Mo-V-Cr dengan kadar 0,85% C, 8% Mo, 4% Cr, dan 2% V. Kromium ditambahkan untuk meningkatkan ketahanan aus dan *hardenability*. Kromium cenderung membentuk karbida $(Fe,Cr)_3C$ (Smith. 1993).

QU Minggui (2013) telah melakukan penelitian tentang karakterisasi struktur mikro dan fasa baja perkakas AISI M2 hasil coran dengan komposisi kimia (%berat) 0,87 C; 6,06 W; 4,79 Mo; 4,09 Cr; 1,89 V; dan Fe *balanced*. Fasa yang terbentuk adalah α -Fe, M_2C , γ' , dan MC (M adalah logam Fe, Mo, W, Cr, dan V). Karbida eutektik M_2C mengandung 17,27 Fe; 41,23 W; 21,40 Mo; 5,73 Cr; dan 9,28 V. Sedangkan matriks didominasi oleh Fe 83,73% berat.

Keberadaan (jumlah, tipe, distribusi, morfologi, dan dimensi) karbida dalam baja perkakas kecepatan tinggi sangat penting untuk menentukan sifat mekaniknya. Oleh karena itu, riset yang lebih mendalam diperlukan untuk mengetahui pengaruh unsur paduan Cr terhadap struktur mikro dan sifat mekanik pada baja karbon perkakas kecepatan tinggi.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh komposisi kromium (Cr) terhadap struktur mikro AISI M10 paduan Fe-Mo-V-Cr?
2. Bagaimana pengaruh komposisi kromium (Cr) terhadap kekerasan AISI M10 paduan Fe-Mo-V-Cr?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Reaksi kimia logam cair dengan lingkungan diabaikan
2. Temperatur peleburan dianggap homogen
3. Pemaduan Fe-Mo-V-Cr dianggap homogen

1.4 Tujuan Penelitian

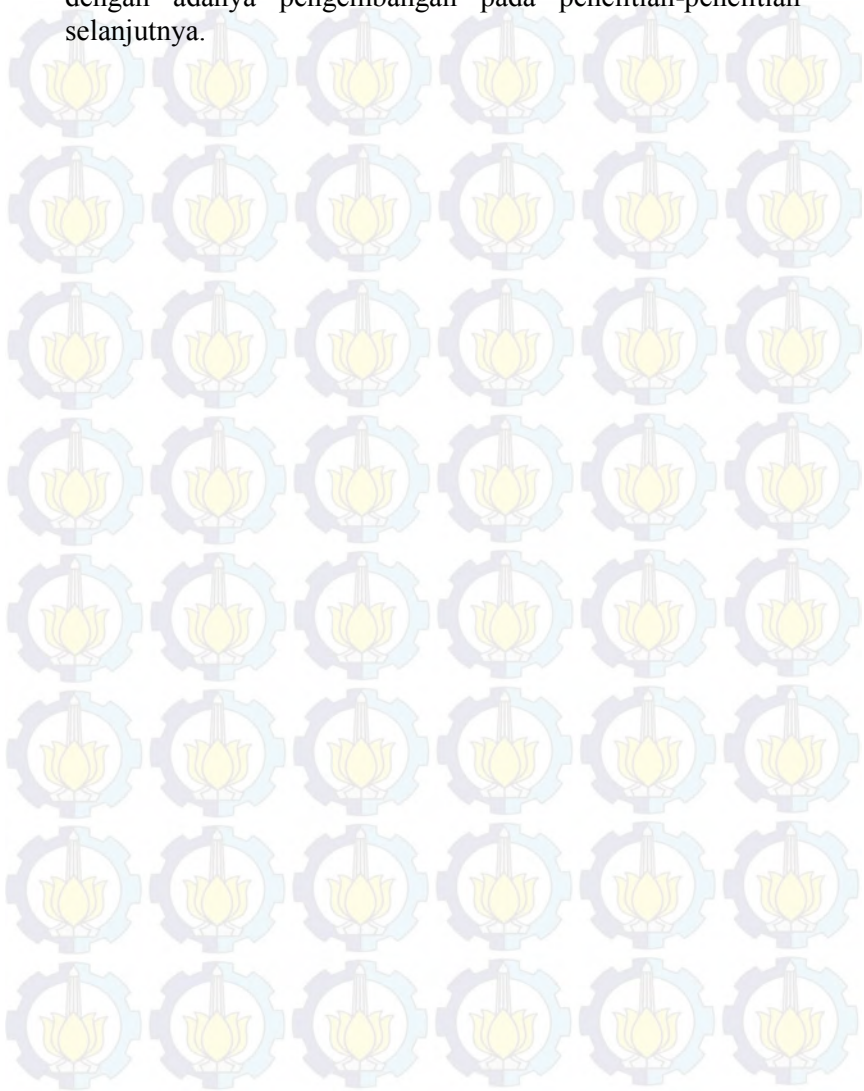
Tujuan dari diadakannya penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh komposisi kromium (Cr) terhadap struktur mikro AISI M10 paduan Fe-Mo-V-Cr
2. Menganalisis pengaruh komposisi kromium (Cr) terhadap kekerasan AISI M10 paduan Fe-Mo-V-Cr

1.5 Manfaat penelitian

Penelitian ini bermanfaat untuk menghasilkan produk mata pahat bubut yang difabrikasi melalui pengecoran dengan menggunakan material baja perkakas kecepatan tinggi AISI M10. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan sumbang asih pengembangan ilmu pengetahuan mengenai pengaruh unsur paduan pada baja perkakas berbasis sistem paduan Fe-Mo-Cr-V, hubungan struktur mikro dan sifat mekanik baja perkakas, dan pengecoran baja perkakas. Kedepan, produksi

mandiri baja perkakas di Indonesia diharapkan dapat terwujud dengan adanya pengembangan pada penelitian-penelitian selanjutnya.



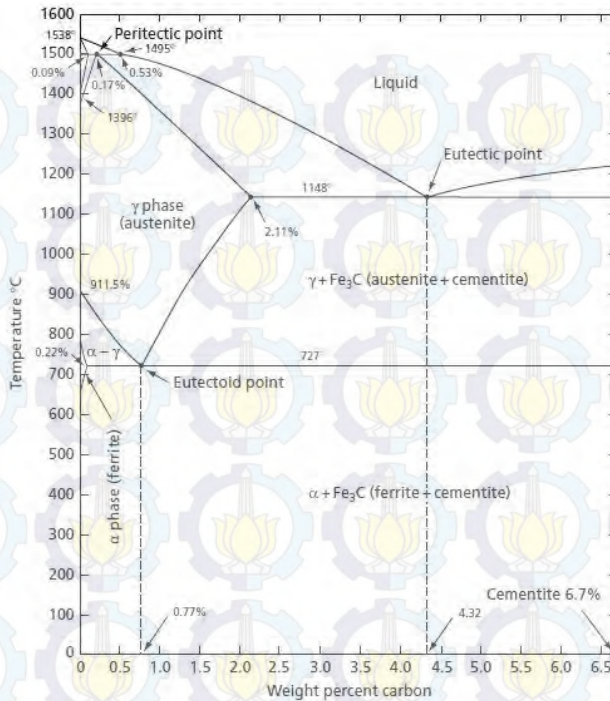
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja

Baja merupakan paduan yang tersusun atas besi (Fe) dan unsur lain. Karbon (C) adalah unsur paduan utama dalam baja. Baja karbon mengandung 0 – 2% karbon. Berdasarkan komposisi kimia, baja digolongkan menjadi dua kelompok, yaitu: baja karbon (baja karbon tanpa paduan, *plain carbon steel*) dan baja paduan. Baja karbon yang digunakan dalam bentuk batang dan tempa mengandung karbon, maksimum 1,65% Mn, maksimum 0,6% Si, maksimum 0,6% Cu, dan maksimum P serta S. Unsur Mn, Si, Cu, P, dan S biasanya merupakan sisa dari proses pembuatan besi/baja yang nilainya ditekan sampai kadar yang kecil dan karena kadarnya yang sedikit maka tidak banyak berpengaruh pada sifat mekanik baja tersebut (Krauss. 2005).

Baja paduan mengandung karbon dan jumlah mangan, silicon, tembaga, fosfor, dan sulfur yang terbatas dengan penambahan unsur paduan, seperti: aluminium, kromium, kobalt, niobium, molybdenum, nikel, titanium, tungsten, vanadium, zirconium, dsb. Berdasarkan jumlah unsur paduan yang ditambahkan, baja paduan terbagi dua kelompok, yaitu: baja paduan rendah (*low alloy steel*) dan baja paduan tinggi (*high alloy steel*). Pada baja paduan rendah, terdapat sedikit unsur paduan selain karbon yang ditambahkan. Sedangkan baja paduan tinggi mengandung kadar unsur paduan yang besar yang sengaja ditambahkan untuk meningkatkan karakteristik sifat dari baja tersebut. Baja tahan karat dan baja perkakas juga termasuk dalam baja paduan tinggi yang banyak digunakan dalam industri (Krauss. 2005).



Gambar 2.1 Diagram Fase Fe-Fe₃C (Abbaschian. 2009)

Pada Gambar 2.1, terdapat beberapa fasa yang mungkin terbentuk dalam paduan Fe-Fe₃C. Pertama, fasa karbida besi (sementit) yang pada dasarnya merupakan senyawa metastabil. Kesetimbangan sesungguhnya adalah besi dan grafit. Pada praktisnya, sulit ditemukan grafit dalam baja (0,03 – 1,5% C) meskipun kadang dapat muncul pada besi tuang (2 – 4% C) dengan penambahan elemen paduan berupa silikon.

Kedua, Fe-γ (austenit) yang merupakan larutan padat dengan kelarutan karbon dalam besi maksimum 2% pada temperatur 1147°C. Kelarutan yang besar ini sangat penting pada proses perlakuan panas. Ketiga, Fe-α (ferrit) memiliki

kelarutan karbon yang terbatas 0,02% C pada 723°C. Sehingga ketika kadar karbon meningkat dari 0,05 hingga 1,5% C maka karbida besi dan ferrit akan membentuk campuran (perlit).

Keempat, fasa Fe- δ (besi delta) memiliki kelarutan karbon yang sangat terbatas antara 1390-1534°C. Besi delta menghilang secara sempurna pada karbon yang lebih dari 0,5% (Honeycombe. 1995).

Dari diagram Fe-Fe₃C pada Gambar 2.1, baja dapat diklasifikasi berdasarkan kandungan karbon yang dimiliki, antara lain: baja karbon rendah, baja karbon menengah, dan baja karbon tinggi. Sifat mekanik baja karbon sangat sensitif terhadap kandungan karbon dalam baja (Callister. 2010).

Baja karbon rendah tersusun atas struktur ferit dan perlit. Sehingga baja ini relatif lunak dan kekuatan rendah tetapi memiliki keuletan tinggi dan ketangguhan, dan juga kemampuan *machinability* dan *weldability* tinggi. Baja ini tidak dapat dikeraskan melalui *heat treatment* untuk membentuk martensit, hanya bisa dikeraskan dengan *cold working*. Sifat mekanik baja karbon rendah memiliki kekuatan luluh 275 MPa (40.000 psi), kekuatan tarik 415 – 550 MPa (60.000 – 80.000 psi) dan elongasi 25% (Callister. 2010).

Baja karbon menengah dapat dikeraskan dengan austenitisasi, pendinginan cepat, dan tempering untuk meningkatkan sifat mekaniknya. Hanya saja baja ini memiliki sifat mampu keras (*hardenability*) yang rendah, hanya sebagian kecil permukaan yang mengeras. Aplikasinya banyak digunakan sebagai rel kereta, gear, crankshaft, dan komponen otomotif lain serta komponen struktural yang membutuhkan kombinasi kekuatan, kekerasan, dan ketangguhan yang memadai (Callister. 2010).

Baja karbon tinggi merupakan baja yang mengandung karbon antara 0.60-1.4%. Baja tersebut memiliki sifat sangat keras dan kuat tetapi keuletannya paling rendah daripada baja karbon jenis yang lain. Baja ini hampir selalu ditemukan

dalam kondisi dikeraskan dan di-temper untuk mendapatkan sifat tahan aus yang super untuk keperluan perautan dan alat permesinan. Baja perkakas dan baja untuk dies kebanyakan dibuat dengan material baja karbon tinggi.

Tabel 2.1 Spesifikasi baja karbon tinggi (*ASM Handbook vol. 1. 1990*)

AISI	Kekuatan Tarik (MPa)	Kekuatan Luluh (MPa)	Elongasi (%)	Kekerasa (HB)
1060	620	480	10	183
1080	680	520	10	192
1090	680	520	10	197

Beberapa unsur paduan, seperti: kromium, vanadium, tungsten, molybdenum ditambahkan agar dapat berkombinasi dengan karbon untuk membentuk karbida (misalnya: Cr_{23}C_6 , V_4C_3 , WC) yang sangat keras dan tahan terhadap aus. Beberapa tipe baja karbon tinggi sesuai dengan ASM Internasional tertera pada Tabel 2.1. Baja karbon rendah biasanya digunakan untuk peralatan pemotong, dies untuk pembentukan material, pisau, gergaji besi, dan pegas (Callister. 2010).

2.2 Pengaruh Unsur Paduan

Elemen paduan dapat dipadukan dengan baja untuk membentuk logam paduan. Analisis beberapa unsur paduan dalam baja tidak mungkin / sulit dilakukan dengan diagram ternary pada rentang temperatur yang lebar. Pengaruh unsur paduan terhadap diagram fasa Fe-C disederhanakan menjadi 4 jenis berikut:

1. Membuka bidang gamma

Unsur paling penting dalam kelompok ini adalah nikel (Ni) dan mangan (Mn) dan juga kobalt, rodium, paladium, osmium, iridium, dan platinum. Kedua unsur,

nikel dan mangan, akan menghilangkan fasa bcc Fe- α dan menggantinya dengan Fe- γ pada temperatur ruangan. Kedua unsur tersebut menurunkan temperatur transformasi γ menuju α (A_1 dan A_3). Jadi dengan adanya tambahan nikel dan mangan dalam jumlah tertentu dalam baja akan mempermudah terbentuknya austenit dengan pendinginan cepat (*quenching*) sehingga sangat penting untuk produksi baja austenitik.

2. Memperlebar bidang gamma (*austenite stabilizer*)

Karbon dan nitrogen adalah unsur paduan utama dalam kelompok ini. Bidang gamma diperlebar tetapi rentang keberadaannya dipotong oleh pembentukan senyawa baru. Cu, Zn, dan Au memiliki pengaruh yang sama. Perlebaran bidang austenit dilakukan dengan baik dengan pembentukan larutan padat 2% C atau 2.8% N.

3. Menutup bidang gamma

Banyak unsur yang dapat menahan pembentukan Fe- γ karena memperkecil area gamma. Dalam arti lain, elemen tersebut berperan dalam pembentukan ferrit dan fasa α - δ menjadi kontinu. Silikon, aluminium, berilium, dan forfor termasuk kelompok ini, bersama dengan unsur carbide former kuat, seperti: titanium, vanadium, molibdenum, dan kromium.

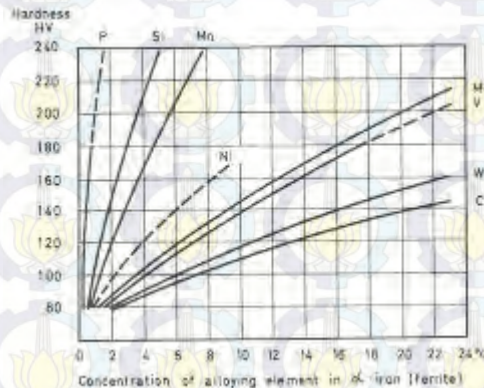
4. Memperkecil bidang gamma (*ferrite stabilizer*)

Boron adalah unsur terpenting dalam kelompok ini, bersama dengan tantalum, niobium, dan zirkonium. Bidang gamma mengecil dan diikuti dengan pembentukan senyawa (Honeycombe. 1995).

Sedangkan berdasarkan transformasi austenit menjadi ferit-karbida pada pendinginan lambat, unsur paduan dibagi menjadi 3 kategori, yaitu:

1. Unsur yang terlarut dalam ferrit
2. Unsur yang stabil dalam karbida dan masuk pada ferrit
3. Unsur yang stabil hanya dalam karbida

Unsur yang tergolong pada kategori pertama adalah tembaga, fosfor, dan silikon. Kelarutan dalam sementit atau karbida sangat rendah (Honeycombe, 1995). Pengaruh unsur paduan ini dalam ferit ditunjukkan oleh Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Pengaruh unsur paduan dalam ferit

Kebanyakan unsur paduan tergolong dalam kategori kedua. Unsur-unsurnya antara lain: Mn, Cr, Mo, V, Ti, W, dan Nb. Secara termodinamik, unsur tersebut lebih stabil dalam bentuk karbida daripada dalam sementit. Meskipun demikian, mereka juga larut dalam ferit. Ketika unsur tersebut ditemukan di dalam ferit maka mereka akan berfungsi sebagai pembentuk dan penstabil ferit sekaligus (Avner, 1974).

Nitrogen menjadi unsur penentu dalam kelompok ketiga. Nitrogen membentuk ikatan antara karbo-nitrida dan besi atau unsur paduan lain. Unsur paduannya antara lain: Titanium (Ti) dan Aluminum (Al) merupakan unsur yang sangat stabil dalam nitrida (Honeycombe, 1995).

2.3 Kromium

Kromium adalah unsur yang termasuk dalam urutan sembilan unsur paling banyak ditemukan di kerak bumi.

Unsur tersebut sering ditemukan dalam bentuk oksidanya, antara lain: Cr_2O_3 , CrO , Cr_2O_3 , dan $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Senyawa kromium dapat dikenali dengan warna hijau, merah, atau kuning. Unsur kromium bersifat keras, getas, dan logam kelabu yang mengkilap. Sifat fisik dan mekanik kromium ditunjukkan oleh Tabel 2.2. Kromium banyak diaplikasikan untuk keperluan dekoratif, perlindungan, dan komponen otomotif. Kromium merupakan unsur penting dalam pembuatan baja tahan karat karena membuat baja lebih kuat dan lebih tahan terhadap korosi (Lagowski. 2004).

Tabel 2.2 Sifat fisik kromium (ASTM International, 2000)

Struktur Kristal	BCC
Massa Jenis	$7.19 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Massa Atom	51.9961(6)
Nomor Atom	24
Titik Lebur	1860°C
Titik Didih	2670°C
Kekerasan	8.5 skala moh

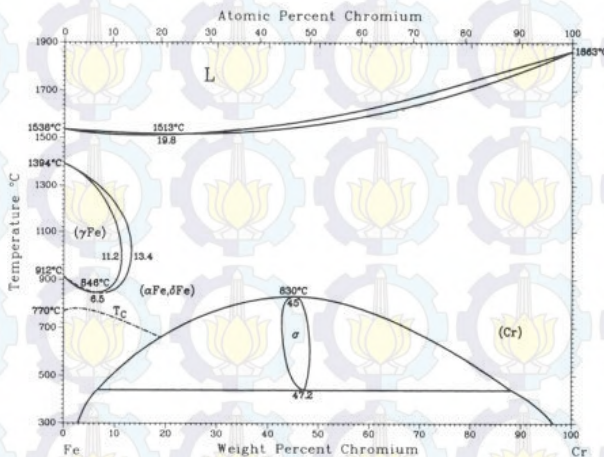
Penambahan sedikit kromium pada paduan Fe-C pada temperatur 890°C (1634°F) akan membentuk struktur sementit M_3C (M merupakan kombinasi atom Fe dan Cr). Penambahan sejumlah banyak kromium menyebabkan pembentukan karbida M_7C_3 dan M_{23}C_6 . Karbida tersebut akan muncul dengan catatan kadar karbon dalam baja mencukupi (Krauss. 2005).

2.4 Paduan Fe-Cr-C

Banyak baja dan besi tuang komersial mengandung unsur paduan penstabil ferrit (Si, Cr, Mo, dan V) dan penstabil austenite (Mn dan Ni). Diagram fasa biner besi-kromium yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 juga masih dalam pengaruh kromium sebagai unsur penstabil ferrit. Pada temperatur solidus, struktur BCC kromium terbentuk sebagai

larutan padat δ -ferrit. Pada temperatur yang lebih rendah, Fe- γ muncul dalam kondisi tertutup (*loop*) hingga sekitar 11,2% Cr. Dengan kadar karbon yang cukup, paduan besi-kromium dengan kadar 11,2% Cr dapat dikeraskan melalui perlakuan panas.

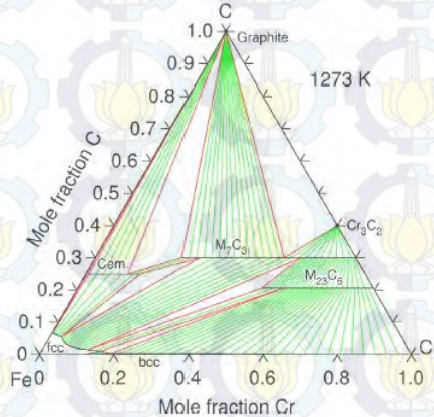
Pada temperatur rendah, larutan padat BCC dari ferrit masih ditemukan dalam bentuk α -ferrit. Dalam hal ini, α -ferrit sama strukturnya dengan δ -ferrit. Tanpa adanya karbon dan kadar kromium melebihi 13%, grade paduan ini tidak dapat dikeraskan dan termasuk dalam kategori baja tahan karat. Namun pada temperatur yang rendah, ditemukan fasa sigma yang keras, getas, dan perlu dihindari dalam baja tahan karat (*ASM Metals Handbook vol. 3. 1990*).



Gambar 2.3 Diagram keseimbangan Fe-Cr (Davis. 1995)

Dalam sistem paduan Fe-Cr-C, variasi fasa stabil dan metastabil harus dipertimbangkan. Pada dasarnya, kromium memiliki afinitas tinggi dengan karbon dan stabil dalam bentuk karbida apapun termasuk sementit. Dalam praktisnya, fasa metastabil sementit lebih banyak diperhitungkan. Dan

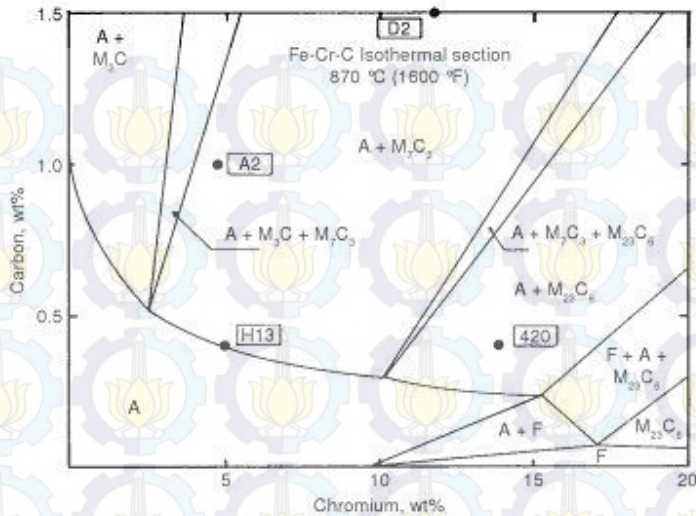
untuk mendapatkan data yang memuaskan, perhitungan dan data eksperimen pada daerah kaya besi dari sistem kesetimbangan Fe-Cr-C yang menjadi fokus. Gambar 2.4 berikut menunjukkan potongan isothermal diagram fasa ternary Fe-Cr-C pada temperatur 1000°C (Durrant. 2004).



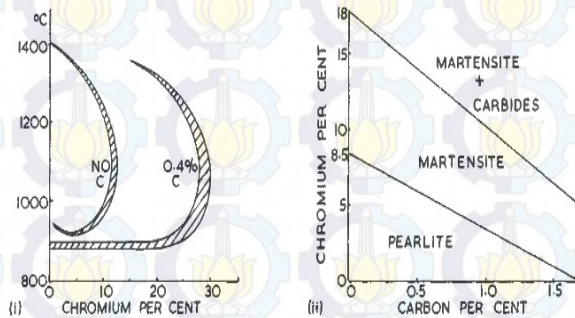
Gambar 2.4 Potongan isothermal diagram fasa ternary Fe-Cr-C pada temperatur 1000°C (Khvan. 2014)

Pengaruh kromium pada paduan Fe-C lebih menarik dianalisis daripada diagram ternary yang rumit. Gambar 2.5 menunjukkan pengaruh perbedaan kadar karbon dan kromium terhadap fasa dan struktur mikro yang dibentuk oleh paduan Fe-Cr-C. Fasa yang akan menjadi matriks dalam paduan diperjelas dalam Gambar 2.6(ii).

Kromium dalam baja akan menurunkan garis temperatur A_4 dan A_3 , serta akan membentuk γ -loop. Fasa α juga akan stabil pada fasa γ . Kecenderungan tersebut ditunjukkan oleh Gambar 2.6(i). Ketika komposisi baja bergeser ke kiri γ -loop, kromium akan meningkatkan kedalaman kekerasan (*depth of hardening*) melalui penghambatan laju transformasi. Namun, kelemahan paduan kromium adalah adanya kecenderungan menaikkan ukuran butir yang mengakibatkan kegetasan.



Gambar 2.5 Potongan isothermal sistem Fe-Cr-C pada temperatur 870°C dengan komposisi karbon dan krom yang berbeda (Krauss. 2005)



Gambar 2.6 Efek kromium sebagai material paduan. (i) efek penambahan karbon dan kromium pada “ γ -loop” di baja kromium; (ii) The Guillet-type diagram (Higgins. 1993)

Baja kromium rendah dengan kandungan karbon sekitar 1,0% akan mempunyai sifat yang sangat keras sehingga sering digunakan sebagai material pada ball-bearings, dan juga bagian dari mesin *grinding*.

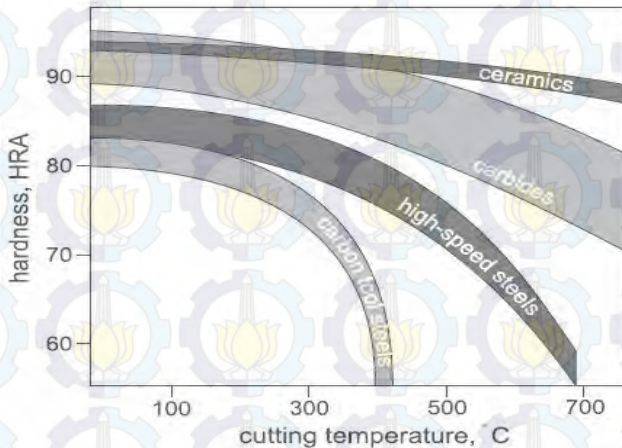
Kromium juga di masukkan dalam jumlah yang besar hingga 25% sehingga akan meningkatkan sifat tahan korosinya karena adanya lapisan oksida pelindung yang terbentuk di permukaan baja dan oksida yang terbentuk sangat lah tipis. Paduan ini bersifat *ferritic* dan *non-hardening* ketika kandungan karbon dan nitrogen dijaga tetap dalam jumlah batas yang rendah. Pada diagram Schaeffler terindikasi bahwa kehadiran karbon dan nitrogen akan meningkatkan jumlah martensit pada kadar 13% kromium sehingga sifatnya akan getas ketika terjadi pendinginan seperti pendinginan pada sambungan las (Higgins, 1993).

2.5 Perkakas Potong (*Cutting Tools*)

Perkakas potong (*cutting tools*) adalah instrumen / peralatan yang digunakan untuk menghilangkan sebagian benda kerja. Material penyusun perkakas potong harus lebih keras daripada benda kerja agar proses permesinan dapat berjalan dengan baik. Material perkakas dapat terbuat dari berbagai macam jenis, misalnya: baja karbon, baja paduan kecepatan tinggi, karbida, keramik, boron polikristalin, dan intan polikristalin. Perkakas potong banyak diaplikasikan untuk pisau dapur, pisau cukur, gergaji kayu atau besi, dan permesinan di industri.

Kekerasan, ketangguhan, dan ketahanan aus merupakan parameter penting dalam menentukan aplikasi peralatan perkakas. Kekerasan berhubungan dengan ikatan intermolekuler yang dapat mempertahankan geometri material tanpa adanya deformasi permanen. Kekerasan juga dapat direpresentasikan sebagai kemampuan material menahan deformasi terpusat. Dalam konteks peralatan perkakas, kekerasan didefinisikan sebagai kemampuan untuk penetrasi

ke dalam benda kerja. Karakteristik ini sangat penting ketika proses pengerjaan dimana panas timbul akibat gesekan *tools* dan benda kerja. Kekerasan berbagai perkakas potong pada rentang temperatur tertentu direpresentasikan pada Gambar 2.7 (Davim. 2014).



Gambar 2.7 Nilai kekerasan material perkakas dalam fungsi temperatur (Davim. 2014)

Berdasarkan jenis *raw material*, perkakas potong (*cutting tool*) dibedakan menjadi beberapa jenis, yaitu:

1. Baja perkakas

Baja yang digunakan untuk perkakas adalah jenis baja kecepatan tinggi yang mengandung molibdenum (tipe M) dan tungsten (tipe T). Baja perkakas ini relatif tangguh dibandingkan material perkakas lain. Penambahan unsur paduan dan perlakuan panas meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus.

2. Paduan kobalt

Paduan kobalt-kromium-tungsten paling banyak ditemukan dalam keadaan cor. Paduan tersebut tidak

dapat dikeraskan melalui perlakuan panas. Kekerasan maksimum 55-65 HRC.

3. Karbida

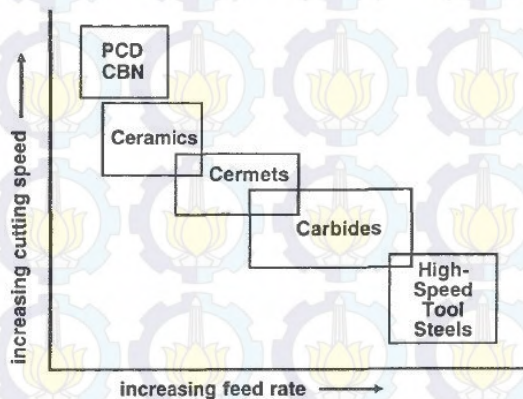
Karbida yang memiliki sifat keras dan tahan aus ini biasanya diikatkan pada binder kobalt atau nikel. Sifat kekerasan dan ketangguhannya dapat diubah melalui modifikasi perbandingan karbida dan matriks serta ukuran butirnya.

4. Keramik

Material keramik lebih stabil pada temperatur tinggi daripada karbida. Namun ketahanan terhadap patah (ketangguhan) rendah. Untuk mengatasi hal itu, keramik digabungkan dengan binder metalik.

5. Intan polikristalin

Intan polikristalin dan boron nitride merupakan material dengan kekerasan sangat tinggi. Material tersebut biasa digunakan untuk memotong besi tuang dan paduan super. Namun, tidak untuk baja karena akan memicu grafitisasi intan akibat kelarutan dan sifat katalis dari besi.



Gambar 2.8 Material perkakasi sesuai dengan aplikasi permesinan (Davis. 1995)

Material untuk peralatan perkakas memiliki respon berbeda terhadap kecepatan potong dan laju pemakanan. Gambar 2.8 menunjukkan skema aplikasi material perkakas pada berbagai kondisi permesinan (kecepatan potong dan laju pemakanan).

Material perkakas tidak dapat memenuhi semua kondisi dalam proses permesinan. Setiap material yang dipilih untuk perkakas akan bekerja maksimal pada kondisi operasional tertentu. Beberapa faktor yang berpengaruh dalam pemilihan material perkakas, antara lain:

1. Kekerasan dan kondisi benda kerja
2. Jumlah material yang harus dihilangkan/dipotong
3. Keakuratan dimensi
4. Kepadatan dari tools dan bendakerja
5. Kecepatan dan besar material yang diberikan (feed)
6. Kondisi operasional (gaya dan temperatur)
7. Harga dan umur pakai (Davim. 2014)

Dalam pengembangan material untuk perkakas potong, performa dan sifat mekanik material sangat penting dipertimbangkan agar dapat meningkatkan produktivitas proses permesinan. Sifat utama yang digunakan untuk mendesain perkakas potong, antara lain:

1. Ketangguhan

Ketangguhan peralatan perkakas berhubungan dengan ketahanan material terhadap beban patah pada saat energi yang diberikan melebihi batas. Kondisi tersebut tersebut terjadi apabila laju pemakanan benda kerja tinggi, gangguan, sifat benda kerja tidak homogen, dan material tidak kompak.

2. Ketahanan deformasi akibat temperatur

Semakin cepat proses pemotongan maka deformasi plastik semakin mungkin terjadi akibat meningkatnya temperatur. Dalam kondisi demikian, fasa pengikat karbida dapat

melunak dan terdeformasi sehingga menyebabkan kegagalan material.

3. Ketahanan aus dan kekerasan

Peralatan perkakas harus memiliki ketahanan terhadap aus, abrasi oleh senyawa kimia, dan kekerasan yang cukup. Penyeimbangan sifat tahan aus dengan ketangguhan sangat penting dilakukan. pada umumnya, proses permesinan kecepatan tinggi membutuhkan material yang tahan abrasi kimia yang tinggi. Material inert (stabil atau tidak mudah bereaksi) seperti oksida dan nitrida cocok untuk kondisi pemotongan yang cepat.

4. Ketahanan terhadap retak

Retak terjadi ketika gaya mekanik terlalu tinggi sehingga menghasilkan perubahan temperatur yang sangat cepat selama proses permesinan. Retak umumnya diawali ketika tegangan terpusat pada area tertentu dan melebar secara paralel pada bidang material perkakas (Davis. 1995).

2.6 Baja Perkakas

Baja perkakas (*tool steel*) adalah baja karbon, paduan, atau baja kualitas tinggi yang dapat dikeraskan. Baja tersebut biasanya dilebur dalam tungku elektrik dan diproduksi berdasarkan spesifikasi khusus. Baja ini banyak digunakan untuk material hand tool, seperti cutting, shaping, forming, dan blanking. Aplikasi baja perkakas sangat luas karena memiliki sifat tahan aus, kekuatan, dan ketangguhan yang baik. Performa baja perkakas bergantung pada kadar karbon, unsur paduan, dan proses perlakuan panas (Robert. 1998).

Klasifikasi baja perkakas telah dikembangkan oleh American Iron and Steel Institute (AISI). Sistem klasifikasi AISI untuk baja perkakas berdasarkan beberapa karakteristik, seperti: paduan (tungsten dan molibdenum), aplikasi (pengerjaan dingin dan panas), atau perlakuan panas (pendinginan air dan oli). Tabel 2.3 menunjukkan tujuh

kelompok utama baja perkakas yang diidentifikasi dengan simbol alfabet.

Tabel 2.3 Klasifikasi baja perkakas (Avner. 1974)

Kelompok	Simbol	Tipe
<i>Water hardening</i>	W	
<i>Shock resisting</i>	S	
<i>Cold work</i>	O A D	<i>Oil hardening</i> <i>Medium alloy air hardening</i> <i>High carbon high chromium</i>
<i>Hot work</i>	H1 – H19 H20 – H39 H40 – H59	<i>Chromium base</i> <i>Tungsten base</i> <i>Molybdenum base</i>
<i>High speed</i>	T M	<i>Tungsten base</i> <i>Molybdenum base</i>
<i>Mold</i>	P1 – P19 P20 – P39	<i>Low carbon</i> <i>Other type</i>
<i>Special purpose</i>	L F	<i>Low carbon</i> <i>Carbon tungsten</i>

Baja perkakas umumnya adalah hasil pengerjaan (*wrought*). Tetapi fabrikasi melalui proses pengecoran yang presisi dapat digunakan pada berbagai aplikasi. Metalurgi serbuk (P/M) juga dapat digunakan untuk membuat baja perkakas. Keuntungan metalurgi serbuk adalah ukuran karbida lebih seragam, distribusi merata, unsur dengan titik lebur yang tinggi dapat diproses dengan mudah.

Dalam pembuatan baja perkakas, *raw material* dipilih dengan hati-hati, bukan hanya kandungan unsur paduan tetapi juga kadar pengotor dan homogenitas produk. Baja perkakas biasanya dilebur dalam EAF (*Electric Arc Furnace*) dan dimurnikan dalam AOD (*Argon Oxygen Decarburization*) untuk mendapatkan komposisi yang akurat, murah, dan sedikit pengotor. Pada proses lebih lanjut, penempaan dan pengerolan dilakukan sebagai proses akhir dengan dimensi

yang presisi. Inspeksi terhadap mikrostruktur, pengotor, kekerasan, ukuran butir, struktur setelah di-annealing, dan hardenability. Selain itu, pengecekan cacat berupa retak dan diskontinuitas dilakukan dengan inspeksi ultrasonik atau magnetik (*ASM Metal Handbook vol. 1. 1990*).

2.7 Baja Kecepatan Tinggi (HSS)

Baja perkakas kecepatan tinggi (*high speed steel*) adalah material perkakas yang digunakan untuk aplikasi permesinan yang membutuhkan laju pemotongan tinggi. Sifat utama baja perkakas ini adalah kemampuan bekerja pada temperatur tinggi akibat cepatnya laju potong. Kekerasan dapat dipertahankan tetap tinggi pada temperatur tinggi, kekerasan baja ini setelah dikeraskan 65 HRC pada temperatur ruang, 60 HRC pada 315°C, 57 HRC pada 425°C, 52 HRC pada 540, dan 33 HRC pada 650°C (*ASM Metal Handbook vol. 1. 1990*). Hal ini disebabkan karena kecepatan potong akan menghasilkan panas selama proses permesinan. Sifat keras pada temperatur tinggi yang merupakan fitur utama baja perkakas ini sering disebut sebagai sifat *hot hardness* atau *red hardness*. Selain itu baja perkakas ini juga memiliki sifat tahan aus yang tinggi (Robert. 1998).

Sifat *hot hardness* diperoleh dengan modifikasi struktur mikro melalui penambahan unsur paduan pembentuk karbida dalam matriks yang telah dikeraskan. Penambahan sejumlah unsur Mo, W, V, dan Cr ke dalam baja dengan karbon menengah dapat membentuk karbida kompleks (Xuefeng. 2012). Distribusi, dimensi, morfologi, tipe, dan fraksi volume karbida sangat penting dalam memperoleh sifat mekanik baja perkakas hasil cor (Mingjia. 2011). Sedangkan metode pengerasan yang dipilih adalah dengan pemanasan yang tinggi mendekati titik lebur hingga mendapatkan ukuran butir austenit yang halus kemudian dilakukan deep hardening dengan pendinginan air, perlakuan panas tempering juga diperlukan (Robert. 1998).

Terdapat 2 klasifikasi baja perkakas kecepatan tinggi, yaitu berbasis molibdenum (M) dan berbasis tungsten (T). Penggunaan basis unsur paduan disesuaikan dengan keberadaan unsur tersebut di sebuah negara. Di Amerika, grup M lebih dominan dalam pembuatan baja perkakas kecepatan tinggi. Berikut Tabel 2.4 menunjukkan komposisi kimia baja perkakas kecepatan tinggi tipe AISI M dan T yang umum digunakan (*ASM Metal Handbook vol. 1*. 1990).

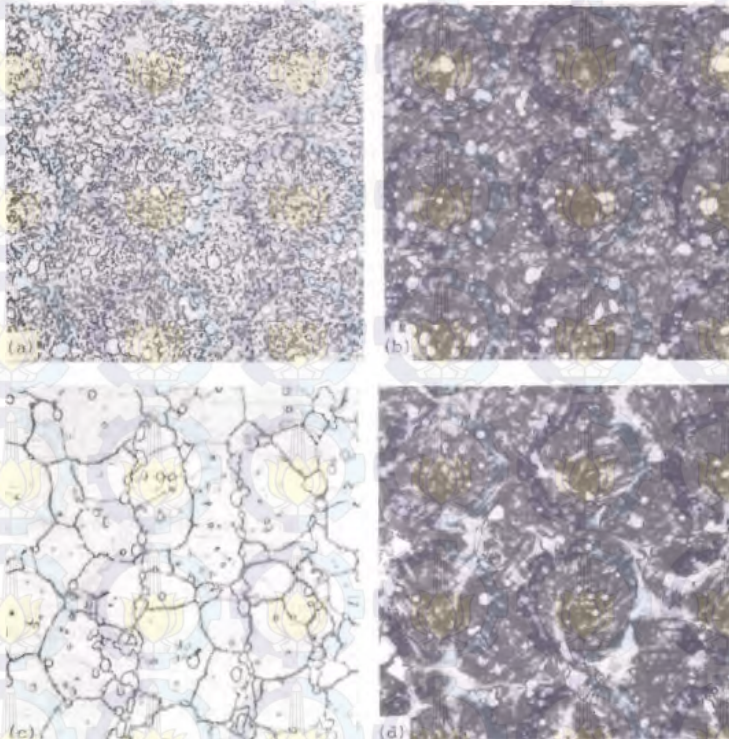
Tabel 2.4 Komposisi kimia beberapa tipe baja perkakas kecepatan tinggi yang umum (Avner. 1976)

AISI	Komposisi (%berat)					
	C	Cr	Mo	W	V	Co
M2	0,85	4,00	5,00	6,00	2,00	...
M7	1,00	4,00	8,75	1,75	2,00	...
M10	0,85	4,00	8,00	...	2,00	...
T1	0,70	4,00	...	18,00	1,00	...
T2	0,80	4,00	...	18,00	2,00	...
T4	0,75	4,00	...	18,00	1,00	5,00

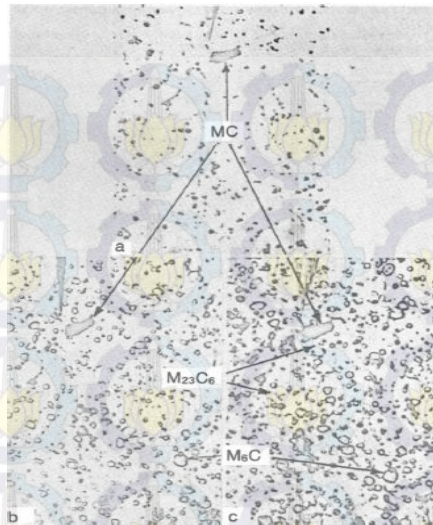
2.8 Struktur Mikro HSS

Struktur mikro baja perkakas kecepatan tinggi dapat dilihat dengan perbesaran 1000x dengan menggunakan etsa 4% nital. Gambar 2.9 menunjukkan struktur mikro AISI M2 (0,85 C; 6,30 W; 4,15 Cr; 1,85 V; dan 5,05 Mo) setelah diberi perlakuan *fully annealing* dimana fasa yang terbentuk adalah partikel karbida dalam matriks ferit. Gambar 2.9b menampilkan struktur mikro setelah didinginkan cepat dan tempering dengan temperatur austenitisasi 1200°C kemudian didinginkan udara mulai 565oC hingga temperatur ruang kemudian *tempering* pada 550 selama 2 jam. Struktur mikro yang terbentuk tersusun atas partikel karbida dalam matriks *tempered martensite*. Gambar 2.9c menunjukkan kondisi telah didinginkan cepat tanpa tempering dimana struktur yang

terbentuk adalah partikel karbida, martensite, dan austenit sisa. Gambar 2.9d merupakan kondisi overheated dimana temperatur austenitisasinya adalah 1245°C . Struktur mikro yang terbentuk tersusun atas partikel karbida yang terpisah dari *tempered martensite*. (Smith. 1993)



Gambar 2.9 Struktur mikro baja perkakas kecepatan tinggi AISI M2 pada kondisi (a) *annealed*, (b) *normal quenched* dan *tempering*, (c) *quenched*, dan (d) *overheated* (Smith. 1993)



Gambar 2.10 Struktur mikro HSS M2 kondisi *annealed* perbesaran 200x dengan etsa (a) 1% asam kromik, (b) 4% NaOH jenuh dalam $KMnO_4$, dan (c) 1% nital (Robert. 1998)



Gambar 2.11 Karbida eutektik, *herringbone*, dan *feathery* pada baja perkakas AISI M2 (Barkalow dkk. 1972).

Gambar 2.10 menunjukkan representasi perbedaan jenis etsa dalam menjelaskan keberadaan karbida dalam struktur mikro baja perkakas AISI M2 dalam kondisi *annealed*. Nital dalam hal ini menunjukkan karbida yang telah disperodisasi dalam matriks ferit. Karbida tersebut tersusun atas M_6C dan MC yang diidentifikasi sebagai partikel kasar, sedangkan $M_{23}C_6$ ditunjukkan oleh partikel yang halus (Robert. 1998).

Sedangkan tipe karbida yang terbentuk pada AISI M2 dapat diidentifikasi pada Gambar 2.11. Fasa karbida utama yang terbentuk pada baja perkakas kecepatan tinggi berbasis tungsten atau molibdenum adalah M_6C karbida Fe-(W,Mo) dan karbida isomorfus MC yang kaya unsur V. Pada Gambar 4.4, struktur mikro baja perkakas AISI M2 dengan etsa $KMnO_4$, perbesaran 243x, karbida eutektik ditunjukkan oleh A, *herringbone* B, dan *feathery* C. Morfologi karbida eutektik berbentuk bulat kecil dan diidentifikasi sebagai MC. Karbida yang bentuknya menyerupai tulang (*herringbone*) diidentifikasi sebagai M_6C . Sedangkan karbida berbentuk bulu (*feathery*) dikenali sebagai kombinasi antara MC dan M_6C . Variasi senyawa karbida dan morfologi karbida tergantung pada komposisi kimia paduan terutama karbon dan unsur pembentuk karbida, seperti Mo, W, V, dan Cr (Barkalow dkk. 1972).

Struktur mikro yang terbentuk pada baja perkakas AISI M2 hampir sama dengan AISI T1. Hal ini dapat dimengerti karena unsur molibdenum dapat menggantikan unsur tungsten dan membentuk senyawa karbida yang sama. Misalnya, pada kondisi *annealed*, terdapat 28,00% karbida dalam baja AISI M2, nilai itu hampir relatif dekat dengan baja AISI T1 yang memiliki 29,2% karbida. Karena berat atom molibdenum sekitar separuh dari berat atom tungsten, maka persentase karbida dalam M2 adalah 20,8% sedangkan T1 28,1% berat (Smith. 1993).

2.9 Pengecoran

Pengecoran adalah salah proses penuangan logam cair ke dalam cetakan dengan memanfaatkan gravitasi atau gaya eksternal kemudian mendinginkan logam tersebut sehingga membentuk padatan logam sesuai dengan desain cetakan. Pengecoran merupakan proses manufaktur paling tua di sejarah. Sekitar 4000 SM, manusia sudah bisa melebur logam.

Prinsip pengecoran logam relatif mudah, yaitu: melebur logam, menuang dalam cetakan, dan pendinginan hingga padat. Namun beberapa parameter dan variabel harus dikendalikan agar proses berjalan dengan baik dan mendapatkan hasil sesuai dengan keinginan. Pengecoran dalam industri dapat menghasilkan *ingot* dan bentuk jadi. *Ingot* merupakan hasil industri besi dan baja dimana bentuk produk sangat sederhana dan perlu dibentuk lagi melalui pengerolan atau penempaan. (Groover. 2010)

Karena produk yang dihasilkan dapat bervariasi, aplikasi proses manufaktur melalui pengecoran sangat luas. Beberapa contoh produk hasil pengecoran, misalnya: perhiasan, patung, blok mesin, velg, kerangka mesin, pipa, dan rumah pompa. Pengecoran dapat digunakan untuk logam ferros atau nonferros. Bahkan polimer dan keramik pun dapat dibentuk melalui proses pengecoran. Adapun keunggulan pengecoran daripada proses manufaktur yang lain, antara lain:

1. Dapat menghasilkan produk dengan geometri yang rumit
2. Mampu menghasilkan produk dengan sedikit atau tanpa proses permesinan lagi
3. Kapasitas produksi besar
4. Cocok untuk semua logam yang mudah dilebur

Namun, proses ini juga memiliki beberapa kelemahan dan keterbatasan, seperti: sifat mekanik, porositas, akurasi dimensi, keamanan proses, dan efek terhadap lingkungan

Klasifikasi proses pengecoran berdasarkan jenis, pola, dan pembuatan cetakan terbagi atas 3 kategori, yaitu:

1. Expendable mold

Cetakan yang dapat dihancurkan dan digunakan kembali ini biasanya terbuat dari pasir, gips, keramik dengan campuran binder (agen pengikat) untuk meningkatkan sifatnya. Cetakan pasir biasanya tersusun atas 90% pasir, 7% tanah liat, dan 3% air. Cetakan ini mampu menahan temperatur tinggi logam cair. Setelah proses pembekuan selesai, cetakan dihancurkan dan dibersihkan dari hasil coran. Pola cetakan pasir dihasilkan dari kayu atau lilin yang mudah dibentuk. Pola atau pattern dapat digunakan terus menerus. Pengecoran yang memanfaatkan cetakan yang dapat dihancurkan ini adalah *sand casting*, *Shell mold*, *evaporative pattern*, *plaster mold*, dan *investment casting*.

2. Permanent mold

Cetakan terbuat dari logam yang dapat mempertahankan kekuatan pada temperatur tinggi. Seperti namanya, cetakan ini harus dapat digunakan secara terus menerus dalam penuangan dan pendinginan logam. Cetakan permanen memiliki konduktivitas termal yang baik daripada cetakan yang dapat dihancurkan. Sehingga proses pembekuan dapat berjalan cepat karena laju pendinginan yang cepat. Hal ini akan mempengaruhi struktur mikro dan ukuran butir hasil coran.

3. Composite mold

Cetakan komposit ini terbuat dari campuran beberapa material seperti pasir, grafit, dan logam. Campuran beberapa material digunakan untuk mendapatkan sifat yang baik seperti menaikkan kekuatan cetakan, mengontrol laju pendinginan, dan mengoptimalkan aspek ekonomi. cetakan komposit dapat digunakan sebagai cetakan permanen atau dapat dihancurkan (Kalpakjian. 2009).

2.9.1 Sand Casting

Metode pengecoran dengan cetakan pasir (*sand casting*) digunakan luas meliputi industri tradisional hingga modern. Di amerika, 15 juta ton logam dicor menggunakan metode ini. Aplikasinya sanngat luas, seperti: komponen mesin, impeller turbin, propeler kapal, dan rumah pompa.

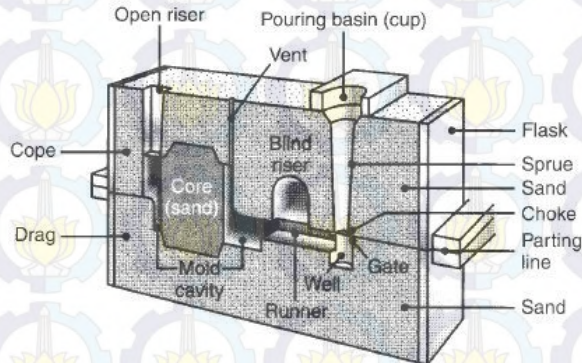
Pada dasarnya, proses pengecoran dengan cetakan pasir, meliputi: pembuatan pola atau pattern yang dimasukkan dalam pasir, pembuatan gating system, memindah pola dari cetakan pasir, menuang logam cair ke dalam cetakan, pembekuan di dalam cetakan, dan penghancuran cetakan pasir, serta pemindahan hasil coran.

Pasir yang digunakan untuk cetakan dalam sand casting adalah silika (SiO_2). Karakteristik titik lebur yang tinggi menjadikan cocok untuk menjadi cetakan. Terdapat dua jenis pasir yang digunakan yaitu pasir alam dan sintetik. Pasir sintetik lebih mudah untuk kontrol komposisi. Dalam memilih jenis pasir untuk cetakan, terdapat beberapa faktor yang harus dipertimbangkan, antara lain: kekasaran serbuk, kehalusan permukaan cetakan, dan unsur pengotor. Meskipun pasir halus memiliki kekuatan yang cukup, namun pasir tersebut memiliki permeabilitas yang rendah terhadap fluida. Permeabilitas cetakan yang baik dapat menghilangkan gas atau uap yang terbawa dalam logam cair selama penuangan. Cetakan harus tidak lengket dengan logam agar memungkinkan logam untuk menyusut tanpa menyebabkan retak.

Gambar 2.12 menunjukkan skema cetakan pasir untuk proses pengecoran. Fitur yang biasanya ada dalam cetakan antara lain:

1. *Flask*, akan menyokong cetakan dari atas atau bawah.
2. *Pouring basin*, dimana logam cair dituang
3. *Sprue*, saluran untuk mengalirkan logam cari ke bawah
4. *Runner*, saluran yang menghubungkan sprue dan pintu cetakan

5. *Riser*, menyediakan logam tambahan untuk menghindari penyusutan saat solidifikasi
6. *Core*, pola yang diletakkan dalam cetakan untuk membuat lubang pada hasil coran.



Gambar 2.12 Ilustrasi bagian-bagian cetakan pasir
(Kalpakjian. 2009)

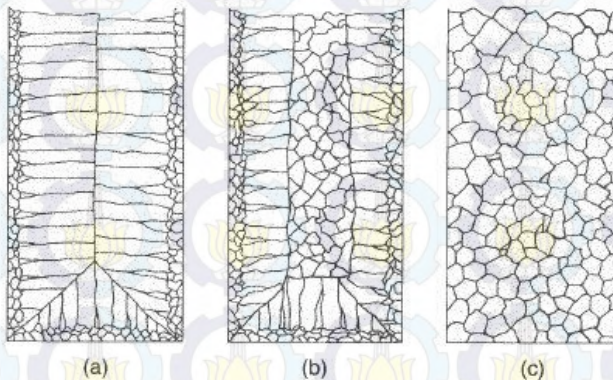
Pola atau pattern yang digunakan di dalam cetakan dapat terbuat dari kayu, plastik, atau logam. Pemilihan material pola tergantung pada ukuran dan bentuk coran yang disesuaikan dengan keakuratan dimensi dan kualitas hasil yang diinginkan. Karena pola digunakan berulang-ulang untuk membuat cetakan, maka kekuatan dan umur pakai harus diperhatikan dengan baik. Material yang dipilih dapat dikombinasikan untuk mengurangi keausan pada bagian permukaan. Desain pola merupakan aspek penting dalam operasional pengecoran. Desain pola harus mempertimbangkan geometri, penyusutan logam, memudahkan logam cair mengalir mengisi rongga cetakan, dan harus mudah untuk dilepas dari cetakan pasir.

Dalam prakteknya misalnya untuk blok mesin dan *valve*, hasil coran juga membutuhkan bentuk lubang. *Core* dibuat dalam rongga cetakan dengan meletakkan material

pembentuk lubang. Seperti halnya cetakan, *core* harus memiliki kekuatan, permeabilitas, dan kemampuan untuk menahan panas tanpa mencair, dan kelengketan dengan hasil coran yang rendah (Kalpakjian, 2009).

2.9.2 Solidifikasi

Setelah penuangan dalam cetakan, logam cair akan bertransformasi menjadi padatan. Dinding cetakan biasanya lebih rendah temperaturnya daripada logam cair, sehingga logam cair akan memadat dengan cepat pada bagian kulit membentuk butiran yang halus. Butiran tumbuh pada umumnya berlawanan dengan arah transfer panas keluar menuju cetakan. Proses solidifikasi bergerak membentuk orientasi butiran *columnar*. Ketika diberikan driving force dari cetakan menuju arah datangnya transfer panas maka butiran akan menjadi *equiaxed* dan kasar. Proses ini dinamakan nukleasi (pengintian) homogen, dimana kristal tumbuh dari dalam logam cair itu sendiri. Gambar 2.13 menunjukkan perbedaan struktur hasil coran beberapa jenis logam dan paduan (Kalpakjian, 2009).



Gambar 2.13 Ilustrasi struktur hasil coran dalam cetakan balok pada (a) logam murni, (b) larutan padat paduan (c) hasil penambahan agen nukleasi (Kalpakjian, 2009)

Solidifikasi logam murni atau paduan selalu membutuhkan waktu. Waktu total yang dibutuhkan logam untuk memadat setelah penuangan bergantung pada ukuran dan bentuk hasil coran yang diinginkan. Hubungan empiris waktu terhadap ukuran dan bentuk dirumuskan dalam aturan Chvorinov, persamaannya adalah:

$$T_{TS} = C_m (V/A)^n \quad (2.1)$$

Dimana T_{TS} adalah waktu total solidifikasi (menit), V adalah volume benda coran (cm^3), A adalah luas permukaan benda coran (cm^2), n adalah eksponen yang biasa bernilai 2, dan C_m adalah konstanta cetakan (menit/cm^2). Nilai konstanta cetakan tergantung pada sifat fisik cetakan (kapasitas kalor, konduktivitas termal), logam coran (kalor lebur, kapasitas kalor, konduktivitas termal), dan temperatur penuangan. Jadi, nilai C_m merupakan hasil eksperimen. Dari aturan Chvorinov diketahui bahwa semakin besar perbandingan volume dan luas permukaan bentuk coran maka akan membutuhkan waktu solidifikasi yang lebih lama. Aturan Chvorinov ini sangat penting untuk desain riser pada cetakan. Riser dengan perbandingan volume dan luas permukaan yang besar dapat menghambat terbentuknya porositas akibat penyusutan selama solidifikasi (Groover. 2010).

2.9.3 Penyusutan dan Toleransinya

Penyusutan yang terjadi selama solidifikasi berlangsung melalui 3 tahap, yaitu: logam cair berkontraksi selama pendinginan, penyusutan akibat perubahan fasa dari cairan menjadi padat atau *solidification shrinkage*, dan penyusutan saat pendinginan padatan hingga temperatur kamar. Mula-mula ketinggian logam cair menurun karena adanya kontraksi selama pendinginan. Kemudian material dari berbagai sisi saling tarik menarik dalam membentuk padatan. Daerah terakhir yang memadat biasanya sudah kehabisan logam cair

sehingga akan membentuk rongga. Nilai matematis penyusutan adalah kebalikan dari koefisien muai logam (Groover. 2010).

Toleransi penyusutan diperlukan untuk menghindari rongga penyebab retak pada logam selama pembekuan. Titik potong antarbagian dalam hasil coran dapat menimbulkan tegangan terpusat. Tegangan ini memicu retak dan dapat dihindari dengan memuluskan sudut dan geometrinya. Pola atau *pattern* juga harus didesain dengan mempertimbangkan penyusutan logam saat solidifikasi. Toleransi penyusutan atau lebih dikenal sebagai *patternmaker's shrinkage allowanes* biasanya berkisar pada rendah 10-20 mm/m. Tabel 2.5 menunjukkan toleransi penyusutan normal beberapa logam yang umum menggunakan *sand casting* (Kalpakjian. 2009).

Tabel 2.5 Toleransi Penyusutan Logam yang dicor dalam Cetakan Pasir (Kalpakjian. 2009)

No	Logam	Toleransi Penyusutan (%)
1	Besi tuang kelabu	0,83-1,3
2	Besi tuang putih	2,1
3	Besi tuang mampu tempa	0,78-1,0
4	Paduan aluminium	1,3
5	Paduan magnesium	1,3
6	Kuningan	1,3-1,6
7	Perunggu fosfor	1,0-1,6
8	Aluminium fosfor	2,1
9	Baja Mangan	2,6

2.9.4 *Finishing* dan Inspeksi

Setelah hasil coran memadat dan dikeluarkan dari cetakan, terdapat beberapa langkah yang perlu dilakukan, antara lain: pemotongan, pemindahan pola lubang, pembersihan permukaan, inspeksi, perbaikan, dan perlakuan panas. Pemotongan atau trimming dilakukan untuk

menghilangkan sprue, runner, riser yang merupakan kelebihan bagian dari hasil coran. Kemudian apabila terdapat pola pembentuk lubang maka perlu dilakukan pemisahan dari hasil coran dengan gaya mekanik atau menambahkan aditif kimia sebagai pemisah. Dan pembersihan permukaan akan banyak dilakukan untuk sand casting karena biasanya terhadap pasir yang menempel pada permukaan coran. Perlu dilakukan pengamplasan dan pemolesan untuk mendapatkan permukaan yang halus. Perlakuan panas juga menjadi opsi yang dapat dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik hasil coran (Groover, 2010).

Ketika seluruh proses pengecoran dan pengerjaan akhir selesai (dari persiapan cetakan hingga pemindahan hasil coran dari cetakan), hal yang penting dilakukan adalah memastikan produk coran dalam kondisi yang baik. Beberapa metode digunakan untuk memeriksa hasil coran untuk mengetahui kualitas dan keberadaan atau tipe cacat yang mungkin ada. Hasil coran dapat diperiksa secara visual atau optikal. Cacat yang berada didalam dapat dilakukan dengan investigasi uji tanpa merusak. Dan uji dengan merusak untuk mengetahui kekuatan, keuletan, dan sifat mekanik lain dapat pula dilakukan untuk mengkorelasikan data dengan keberadaan dan distribusi porositas atau cacat lain dalam hasil coran. (Kalpakjian, 2009)

Pemeriksaan secara visual dapat mendeteksi adanya cacat yang terlihat jelas misalnya *misrun*, *cold shut*, atau cacat permukaan. Pengecekan terhadap dimensi juga penting terkait toleransi yang diijinkan. Pengujian secara metalurgi, kimia, fisik (tekanan, radiografi, uji mekanik) dapat pula dilakukan (Groover, 2010).

2.9.5 Cacat dalam Pengecoran

Committee of Foundry Technical Associations telah mengembangkan standar kategori cacat hasil coran dengan

huruf capital bercetak tebal. Adapun *defect* atau cacat yang sering terjadi dalam proses pengecoran, antara lain:

A. Proyeksi Logam

Terdiri dari fins, flash, dan proyeksi seperti permukaan yang kasar

B. Rongga

Terdiri dari rongga internal dan rongga bulat kecil dan rongga porositas.

C. Diskontinuitas

Termasuk retak, sobek ketika panas (*hot tearing*), dan cold shut. Jika logam yang memadat dibiarkan menyusut bebas maka retak dan sobek mungkin terjadi. Sedangkan cold shut akan terjadi ketika permukaan antara dua logam cair dari pintu yang berbeda bertemu tetapi tidak menyatu sempurna.

D. Cacat permukaan

Berbentuk seperti lipatan permukaan, laps, scars, oksida, dan ikatan cetakan pasir.

E. Pengecoran tidak sempurna

Seperti misrun (pemadatan prematur), logam cair yang dituang tidak mencukupi, runout (hilangnya logam dari cetakan akibat menguap)

F. Kesalahan dimensi

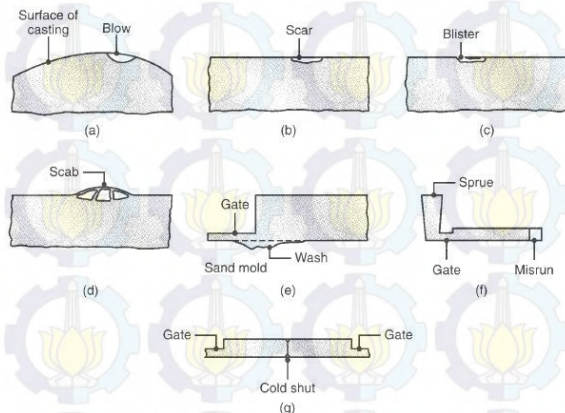
Kesalahan ukuran dan bentuk dapat disebabkan oleh penyusutan yang tidak tepat, serta pola cetakan tidak rata dan mudah terdeformasi.

G. Pengotor

Pengotor dapat masuk kedalam hasil coran ketika melting, solidifikasi, dan berada dalam cetakan. Inklusi yang masuk biasanya bukan logam sehingga sangat membahayakan karena mereka bertindak sebagai tegangan yang terpusat yang akan mengurangi kekuatan produk. Pengotor mungkin terbentuk selama mencair ketika logam cair bereaksi dengan lingkungan

(biasanya oksigen) atau dengan bahan krus (*crusible*) atau cetakan. Reaksi antarkomponen dalam logam cair, terak, dan bahan asing yang terperangkap dalam logam cair juga memungkinkan terbentuknya inklusi.

Gambar 2.14 menunjukkan beberapa contoh cacat hasil coran yang umum terjadi. Cacat yang terjadi dalam proses manufaktur pengecoran tergantung pada beberapa factor antara lain: material, desain bentuk, dan teknik pemrosesan (Kalpakjian, 2009).



Gambar 2.14 Cacat pada hasil coran (Kalpakjian, 2009)

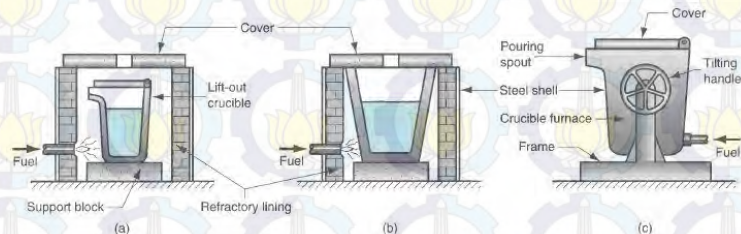
2.9.6 Furnace

Furnace merupakan komponen penting dalam proses pengecoran yang berfungsi sebagai alat pelebur logam dengan memberikan pemanasan yang kontinu. Desain *furnace* yang baik adalah yang memiliki transfer panas yang efektif, ketersediaan bahan bakar dan alat, serta harga dan perbaikan. Selain itu, faktor yang terkait dengan keilmuan metalurgi juga penting diperhatikan, misalnya kemungkinan logam cair berikatan dengan lingkungan, pengendalian komposisi, kadar pengotor, dan jumlah material yang dilebur. Dalam Tabel 2.6 beberapa *furnace* yang sering digunakan akan ditunjukkan.

Tabel 2.6 Furnace peleburan logam (Beeley. 2001)

Energi	Tipe	Furnace	Prinsip pemanasan
Bahan bakar fosil	<i>Shaft Heart Crucible</i>	Kupola	Kokas
		<i>Reverbatory</i>	Minyak dan gas
		<i>Crucible</i>	Minyak dan gas
Listrik	<i>Heart Crucible Melting Channel</i>	<i>Direct/indirect arc</i>	Busur listrik
		<i>Resistor</i>	Resistansi
		<i>Coreless/cored induction</i>	Induksi elektromagnet

Berdasarkan sumber energinya, furnace terbagi menjadi 2 kategori, yaitu pembakaran dan pemanasan listrik. Perbedaan mendasar dari setiap furnace yang memanfaatkan tungku krusibel dengan pembakaran ditunjukkan pada Gambar 2.15.

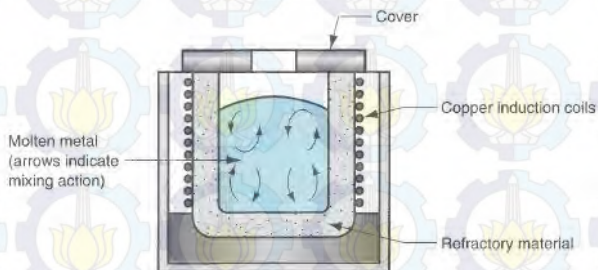
**Gambar 2.15** Tipe tungku krusibel (a) *lift out* (b) stasioner (c) *tilting pot* (Groover. 2010)

Furnace berbahan bakar termasuk juga rotary atau reverbatory telah banyak digunakan untuk melebur logam dengan kapasitas menengah keatas. Logam paduan yang dapat dilebur antara lain tembaga, aluminium, dan besi tuang mampu tempa. Bahan bakarnya dapat menggunakan kokas

atau batubara. Perkembangan terkini dari furnace reverbatory berupa pencampuran dalam nozzle, peleburan skala besar, dan pemanfaatan kembali panas menunjukkan proses peleburan yang efisien. Gas buang yang menyimpan panas pada temperatur lebih dari 600°C digunakan untuk pemanasan awal udara tekanan tinggi.

Tidak seperti hearth furnace dimana burner disembur dari atas secara langsung, transfer panas pada dinding furnace krusibel membutuhkan refraktori yang mempunyai konduktivitas termal yang baik seperti grafit dan silikon karbida.

Penggunaan furnace berbasis listrik semakin banyak digunakan dalam industri pengecoran karena pengendalian proses dan fleksibilitas operasi yang tinggi. Selain itu, pemanasan menggunakan listrik memungkinkan turunnya kadar pengotor karena proses peleburan tanpa menggunakan pembakaran. Furnace berbasis busur listrik dan induksi listrik banyak digunakan dalam hal ini. Electric Arc Furnace merupakan analogi dari hearth furnace yang mana elektroda atau pemanas bersentuhan langsung dengan logam cair. Sedangkan furnace induksi identik dengan furnace krusibel, hanya saja furnace induksi pada prinsipnya memanaskan dari luar tanpa melalui refraktori. Gambar 2.16 menunjukkan rancangan skematik dari tungku induksi.

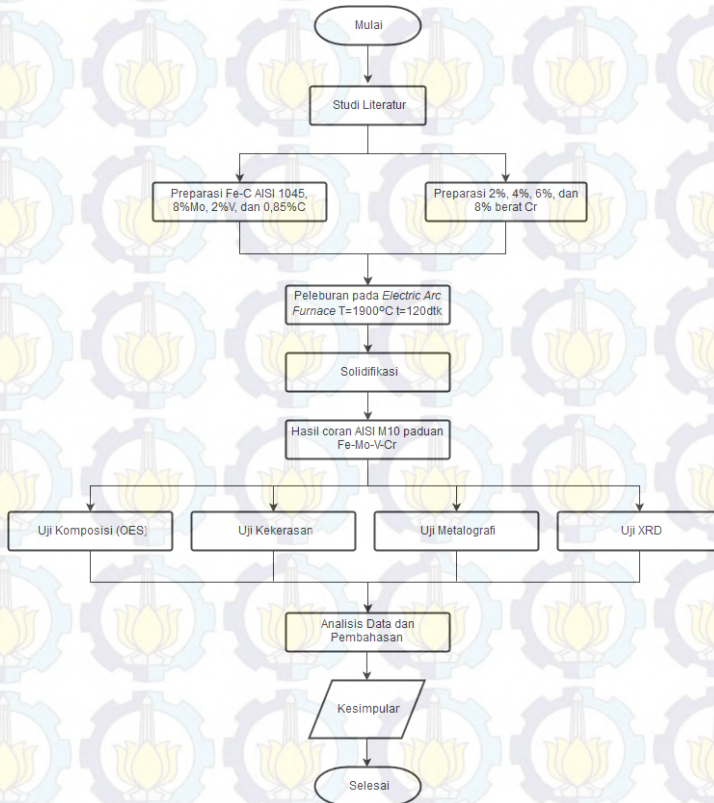


Gambar 2.16 Ilustrasi tungku induksi. (Groover. 2010)

Panas yang dihasilkan oleh tungku induksi merupakan efek dari medan elektromagnetik yang dihasilkan oleh arus induksi listrik. Frekuensi tungku induksi dipilih sesuai dengan ukuran dan fungsi. Penetrasi induksi pada logam yang dipanaskan berbanding terbalik dengan frekuensi arus AC pada lilitan. Efek pengadukan juga meningkat seiring turunnya frekuensi. Frekuensi untuk kapasitas medium adalah 200 – 1000 Hz. Frekuensi 200 Hz sering digunakan untuk besi tuang dimana kuat pengadukan sangat tinggi. Induksi dengan frekuensi 1000 – 3000 Hz digunakan untuk industri kecil dengan kapasitas produksi 100 kg (Beeley, 2001).

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan mengikuti diagram alir sesuai Gambar 3.1. Penelitian ini dimulai dengan persiapan alat dan bahan. Kemudian preparasi spesimen coran paduan. Spesimen

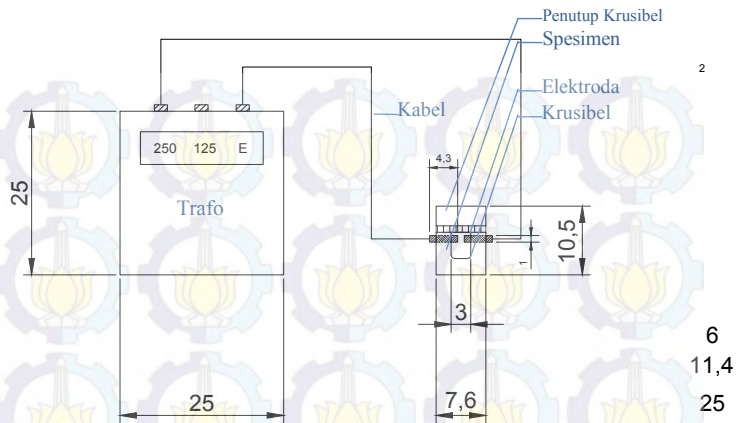
dibersihkan dari pengotor dan dikarakterisasi sifat fisik serta mekaniknya.

3.2 Material

Bahan yang digunakan untuk membuat baja perkakas AISI AISI M10, antara lain: unsur Fe, C, Mo, V, dan Cr. Unsur paduan Fe-C diperoleh dari baja AISI 1045, tambahan unsur C disuplai oleh grafit amorfus. Sedangkan Unsur Mo, V, dan Cr diperoleh dari bahan *ferroalloy* (*ferrochrome*, *ferromolybdenum*, *ferrovanadium*). Baja AISI 1045 berbentuk bentuk plat dengan ukuran 200 x 200 x 16 mm memiliki kadar karbon 0,45% sesuai standar EMS45 didapatkan dari PT. Bhineka Bajas, spesifikasi bahan ditunjukkan pada Lampiran A-1. Material *ferroalloy* (*ferrochrome*, *ferromolybdenum*, dan *ferrovanadium*) yang digunakan dalam penelitian ini didapatkan dari PT. Makmur Meta Graha Dinamika dengan bentuk ingot jenis *low carbon grade* sesuai spesifikasi yang tertera dalam Lampiran A-2, A-3, dan A-4. Bata tahan api jenis C1 yang didapatkan dari UD. Kampung Dukuh digunakan untuk membuat mini furnace. Sedangkan Bahan etsa yang digunakan untuk uji metalografi adalah nital (HNO_3 5 mL + 98% alkohol 95 mL) sesuai standar ASTM E407.

3.3 Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Electric Arc Furnace* dengan kuat arus keluaran 150 Amper yang dimensi skematiknya ditunjukkan pada Gambar 3.2. Alat ini pada dasarnya adalah mesin las yang dimodifikasi pada bagian transformator menjadi mesin *Electric Arc Furnace* yang mampu melebur baja sebanyak 30 g pada temperature 1900°C selama 2 menit ditunjukkan Gambar 3.3.



Gambar 3.2 Dimensi tampak depan *Electric Arc Furnace*



Gambar 3.3 Mesin *Electric Arc Furnace*

Alat penunjang penelitian, antara lain: Neraca analitik Mettler Toledo, kikir pahat, kertas amplas (*grade* 80, 100,

150, 240, 320, 480, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000), gergaji tangan dan mesin, dan mesin *polishing*. Mesin yang digunakan untuk pengujian dan karakterisasi material antara lain:

1. Mikroskop Optik

Mikroskop optik yang digunakan adalah Trinocular Microscope Olympus BX51M-RF, ditunjukkan oleh Gambar 3.3. Mikroskop ini dilengkapi dengan kamera Panasonic WV CP470 yang terhubung dengan komputer. Mikroskop optik ini digunakan untuk mengetahui struktur spesimen dalam skala mikro.



Gambar 3.4 Mikroskop optik

2. Mesin Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan menggunakan alat Universal Hardness Tester Model HBRV-187,5 di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Uji

kekerasan digunakan untuk mendapatkan nilai kekerasan material. Gambar 3.5 menunjukkan alat uji kekerasan.



Gambar 3.5 Alat uji kekerasan

3. OES (*Optical Emission Spectroscopy*)

Pengujian OES (*Optical Emission Spectroscopy*) dilakukan di PT. Barata Indonesia Foundry Unit Gresik dengan standar *database* baja. Pengujian OES digunakan untuk mengetahui komposisi kimia spesimen.

4. XRD (*X-Ray Diffraction*)

Mesin XRD (*X-Ray Diffraction*) yang digunakan adalah XRD X'Pert PAN analytical Cu K α , ditunjukkan pada Gambar 3.6. XRD adalah alat digunakan untuk mengidentifikasi unsur/senyawa/fasa secara kualitatif dan persentase komposisi secara kuantitatif.



Gambar 3.6 Mesin XRD

3.4 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah variasi kadar penambahan unsur kromium yaitu sejumlah 2%, 4%, 6%, 8 % berat.

3.5 Tahapan Penelitian

Persiapan sampel, meliputi:

1. Mempersiapkan bahan paduan Fe-Mo-V-Cr, antara lain: baja AISI 1045, grafit amorfus, ferokrom, feromolibdenum, dan ferovanadium
2. Mengukur massa bahan sebagai variabel kontrol 0,85% berat C, 8% berat Mo, 2% berat V
3. Mengukur massa bahan sebagai variabel bebas 0; 0,2; 0,4; 0,6% berat Cr sesuai dengan perhitungan *mass balance* yang tertera pada Lampiran B-1, B-2, B-3, dan B-4
4. Memasukkan bahan paduan ke dalam furnace yang terbuat dari bata tahan api C1 yang telah disiapkan sesuai dengan desain pada Gambar 3.2

5. Menempatkan dua elektroda grafit melalui luang di samping furnace kemudian menghidupkan *electric arc furnace* selama 2 menit
6. Solidifikasi dilakukan di dalam furnace hingga temperatur ruang
7. Spesimen dibersihkan dari pengotor pada permukaan dan siap untuk dikarakterisasi

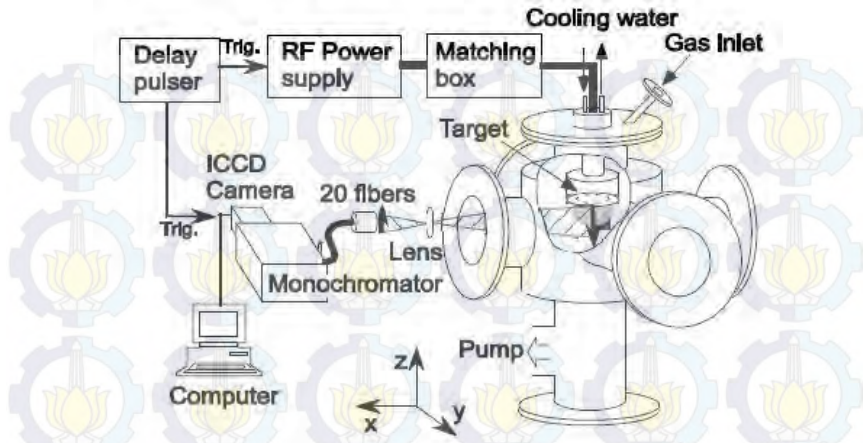
3.6 Karakterisasi

Spesimen baja perkakas yang telah disiapkan kemudian dikarakterisasi untuk dapat dianalisis hasilnya. Pengujian yang dilakukan, yaitu:

3.6.1 Pengujian OES

Pengujian OES dilakukan untuk mengetahui persentase komposisi unsur kimia dalam spesimen uji. Standar pengujian yang digunakan adalah ASTM A571 yang berisi tentang metode analisis komposisi kimia untuk baja, baja tahan karat, dan baja paduan lain. Preparasi spesimen dilakukan dengan mengamplas permukaan agar permukaan menjadi rata dan bersih.

Pada *emission spectroscopy*, energi yang diperoleh dari atom yang mengemisikan radiasi elektromagnetik dikumpulkan dan dianalisis oleh spektrometer. Gambar 3.7 menunjukkan skema ilustrasi OES. Emisi yang terbentuk pada frekuensi tertentu dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis unsur pada spesimen uji. Berdasarkan teori kuantum, elektron menempati level energi yang terendah saat kondisi normal (*ground state*). Namun, ketika atom diberi energi potensial dari luar maka elektron dapat tereksitasi keluar kulit menempati tingkat energi yang lebih tinggi. Kondisi tersebut dinamakan kondisi tereksitasi. Elektron yang keluar ditangkap oleh detektor dan sistem komputer akan mengenalinya melalui konfigurasi energi dari elektronnya. Jadi unsur yang terdapat pada spesimen dapat ketahuai baik secara kualitatif maupun kuantitatif (Nayan. 2009).



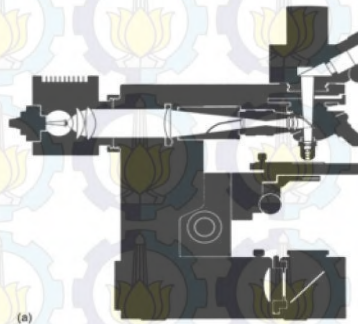
Gambar 3.7 Skema ilustrasi OES (Nayan. 2009)

3.6.2 Pengujian Metalografi

Metalografi adalah cabang ilmu yang mempelajari tentang struktur mikro logam dan paduannya. Beberapa tahap preparasi spesimen yang harus dilakukan sebelum melakukan uji metalografi adalah:

- Meratakan permukaan spesimen dengan kikir. Jika spesimen berukuran kecil, maka *mounting* menggunakan resin diperlukan.
 - Grinding dengan kertas amplas grade 80-200 dilakukan untuk memperhalus permukaan
 - Polishing menggunakan autosol atau alumina diatas mesin polish
 - Etsa dilakukan sesuai standar ASTM E407 Larutan etsa yang digunakan adalah nital (98 mL etanol + 2 mL asam nitrit)
 - Uji metalografi dibawah mikroskop
- Struktur mikro material dapat diperiksa dengan menggunakan mikroskop cahaya dengan perbesaran 50 – 1.000 kali atau dengan mikroskop elektron dengan perbesaran

1.000 – 100.000 kali. Prinsip kerja mikroskop optik dapat dilihat pada Gambar 3.8. Hasil pengamatan yang tampil pada layar komputer adalah representasi gelap terang permukaan spesimen. Apabila permukaan spesimen telah dihaluskan kemudian di etsa menggunakan larutan kimia dengan intensitas rendah, maka akan terbentuk perbedaan rata permukaan. Memunculkan batas butir yang terkikis oleh reaksi dengan larutan etsa. Sinar pantulan dari material akan tergambar pada layar komputer secara representatif (*ASM Metals Handbook vol. 9. 1990*).



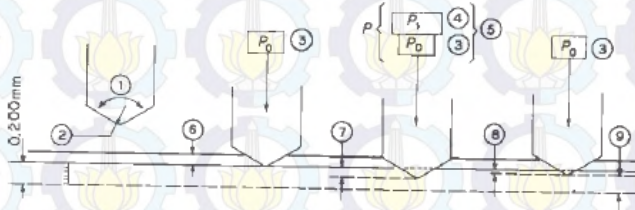
Gambar 3.8 Prinsip kerja mikroskop optik (*ASM Metals Handbook vol. 9. 1990*)

3.6.3 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan yang dilakukan yakni pengujian kekerasan dengan metode Rockwell C. Pengujian kekerasan ini khusus digunakan untuk material dengan kekerasan tinggi, seperti baja perkakas.

Pengujian kekerasan Rockwell C dilakukan sesuai dengan standar ASTM E18 sesuai dengan ilustrasi Gambar 3.9. Indentor berupa kerucut intan dengan sudut puncak 120 derajat dan beban uji sebesar minor 10 kgf dan beban uji mayor 140 kgf. Nilai kekerasan Rockwell didapatkan dari persamaan $HRC = 100 - e$, Dimana e merupakan jarak pada

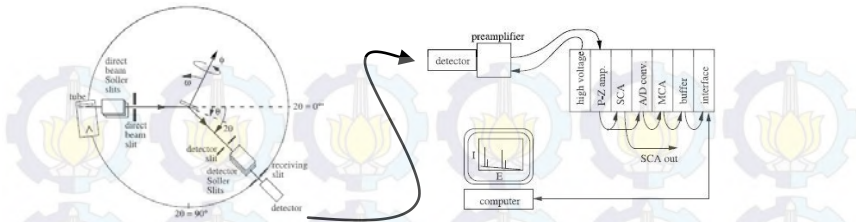
spesimen uji ketika dikenai indentasi dengan beban total per 0,002 mm.



Gambar 3.9 Ilustrasi pengujian kekerasan Rockwell C dengan indenter intan sesuai ASTM E18

3.6.4 Pengujian XRD

Pengujian XRD dilakukan untuk mengidentifikasi unsur/senyawa/fasa dan struktur kristal yang terbentuk secara kualitatif. XRD juga dapat menentukan komposisi secara semikuantitatif dari sampel. Pada dasarnya, atom yang tersusun membentuk struktur kristal dan struktur mikro / fasa dapat dianalisis melalui teknik eksperimental yang berbasis difraksi. Pada eksperimen difraksi, gelombang yang ditembakkan akan membentur pada material dan ditangkap oleh detektor. Detektor mengidentifikasi arah dan intensitas gelombang yang terdifraksi / terpancar keluar dari material. Interferensi gelombang terjadi pada gelombang yang diemisikan atom yang berbeda jenis dan posisinya. Geometri yang direpresentasikan melalui arah gelombang membentuk pola difraksi yang dapat digunakan untuk menentukan sel satuan pada struktur kristal dan senyawa. Gambar 3.10 menunjukkan skema mekanisme kerja dari mesin XRD (Fultz, 2013).



Gambar 3.10 Skema ilustrasi XRD (Fultz, 2013)

Grafik puncak intensitas terhadap sudut 2θ akan didapat melalui pengujian ini. Tahapan untuk melakukan pengujian ini sebagai berikut:

- Spesimen dipreparasi dengan pahat dan amplas untuk meratakan permukaan yang akan ditembak oleh sinar X-Ray.
- Holder diletakkan ke dalam mesin XRD. Setting pengukuran sudut dilakukan pada rentang $10-90^\circ$.
- Data yang tersaji pada layar komputer berupa grafik horizontal dengan puncak grafik pada sudut tertentu.

3.5 Rancangan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dipaparkan, rancangan penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.1.

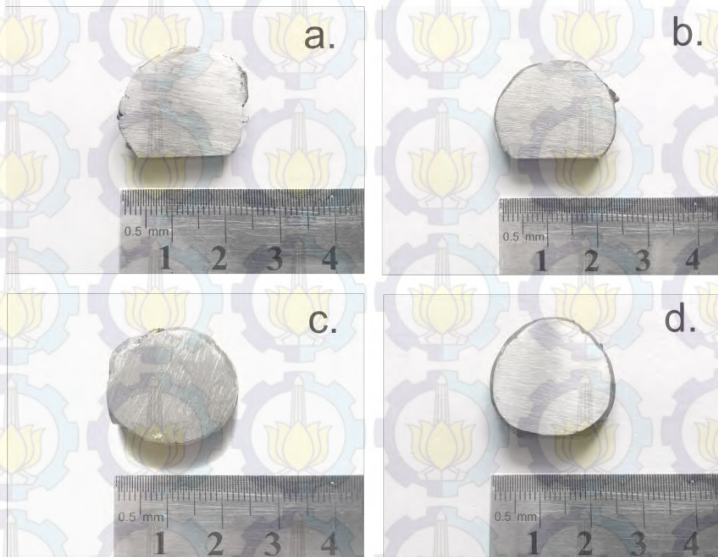
Tabel 3.1 Rancangan Penelitian

Unsur (% berat)					Sampel	Pengujian			
C	Mo	V	Cr	Fe		OES	XRD	Kekerasan	Metalografi
0,85	8	2	2	Bal.	Fe-8Mo-2V-2Cr	√	√	√	√
0,85	8	2	4	Bal.	Fe-8Mo-2V-4Cr	√	√	√	√
0,85	8	2	6	Bal.	Fe-8Mo-2V-6Cr	√	√	√	√
0,85	8	2	8	Bal.	Fe-8Mo-2V-8Cr	√	√	√	√

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Paduan Fe-Mo-V-Cr

Spesimen hasil coran paduan Fe-Mo-V-Cr berbentuk bulat sesuai desain furnace yang digunakan. Gambar 4.1 merepresentasikan potongan melintang penampang spesimen hasil coran paduan Fe-Mo-V-Cr dengan variasi kadar Cr sebesar 2, 4, 6, dan 8% berat.



Gambar 4.1 Hasil coran paduan Fe-Mo-V-Cr dengan variasi kadar Cr sebesar (a) 2, (b) 4, (c) 6, dan (d) 8 % berat

Secara umum, permukaan hasil coran berwarna abu-abu mengkilap. Dengan adanya variasi komposisi Cr dalam hasil coran paduan Fe-Mo-V-Cr tidak tampak adanya perbedaan warna yang signifikan. Pengamatan visual (makroskopis) menunjukkan bahwa tidak terjadi makro segregasi pada

spesimen hasil coran. Hal ini membuktikan bahwa paduan Fe-Mo-V-Cr telah tercampur secara merata (homogen) dan tidak ada gradien konsentrasi unsur paduan pada permukaan dan bagian dalam hasil coran. Secara makro, porositas juga tidak terdeteksi pada permukaan keempat spesimen paduan Fe-Mo-Fe-Mo-V-Cr.

4.2 Komposisi Kimia Paduan Fe-Mo-V-Cr

Pengujian *Optical Emission Spectroscopy (OES)* untuk mengetahui komposisi kimia hasil coran Fe-Mo-V-Cr dilakukan dengan menggunakan alat *Spektroanalyzer Foundry Master* di PT Barata Indonesia.

Tabel 4.2 Massa bahan lebur

Spesimen	Massa (gram)				
	AISI 1045	FeMo	FeV	FeCr	C
Fe-8Mo-2V-2Cr	24,18	3,95	0,75	0,87	0,13
Fe-8Mo-2V-4Cr	23,30	3,95	0,75	1,74	0,14
Fe-8Mo-2V-6Cr	22,42	3,95	0,75	2,61	0,15
Fe-8Mo-2V-8Cr	21,54	3,95	0,75	3,48	0,16

Perhitungan *mass balanced* dilakukan untuk mendesain komposisi paduan dalam proses pemaduan logam (*alloying*) melalui metode pengecoran ini. Setiap unsur paduan dalam bahan lebur diakumulasi menjadi penentu komposisi akhir hasil coran. Berdasarkan perhitungan *mass balanced* pada Lampiran B-1, B-2, B-3, dan B-4, massa bahan lebur yang dimasukkan ke dalam *furnace* untuk setiap spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.1 menunjukkan komposisi kimia beberapa unsur penting dalam hasil coran paduan Fe-Mo-V-Cr yang didapatkan pengujian OES database baja. Data lengkap komposisi kimia yang terdapat pada setiap spesimen ditampilkan pada Lampiran C-1, C-2, C-3, dan C-4.

Tabel 4.1 Komposisi kimia hasil coran paduan Fe-Mo-V-Cr

Spesimen	Komposisi (% berat)					
	Fe	Mo	V	Cr	C	Others
Fe-8Mo-2V-2Cr	86,70	8,44	1,34	2,01	0,62	0,89
Fe-8Mo-2V-4Cr	85,30	7,70	1,83	3,75	0,42	0,90
Fe-8Mo-2V-6Cr	83,60	7,70	1,69	5,95	0,48	0,48
Fe-8Mo-2V-8Cr	80,80	8,21	1,97	6,95	0,72	1,35

Berdasarkan Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa kadar unsur paduan dari hasil coran Fe-Mo-V-Cr tidak sesuai dengan target komposisi yang diharapkan. Unsur Cr dalam hasil coran masing-masing spesimen menunjukkan kadar 2,01%; 3,75%; 5,95%; dan 6,95% berat berbeda dengan desain variabel yang ditentukan, yaitu 2%, 4%, 6%, dan 8% berat. Namun, kecenderungan peningkatan unsur Cr dalam paduan masih terlihat jelas. Kromium merupakan unsur paduan dalam baja yang kadarnya stabil ketika dilakukan pemaduan melalui proses pengecoran. Sifat fisik (titik lebur dan densitas) kromium dan besi tidak jauh beda, yaitu $T_m \text{ Cr} = 1860^\circ\text{C}$, $\rho \text{ Cr} = 7,19 \text{ g/cm}^3$, $T_m \text{ Fe} = 1595^\circ\text{C}$, $\rho \text{ Fe} = 7,87 \text{ g/cm}^3$. Sehingga memungkinkan Cr dan Fe pada hasil coran tercampur homogen tanpa terjadi pengurangan massa akibat penguapan dan fenomena *gravity segregation*.

Sedangkan unsur Mo dalam hasil coran masing-masing spesimen menunjukkan kadar 8,44%; 7,70%; 7,70%; dan 8,21% berbeda dengan desain yang diharapkan yaitu 8% Mo. Unsur V dalam hasil coran masing-masing spesimen menunjukkan kadar 1,34%; 1,83%; 1,69%; dan 1,97% berbeda dengan desain yang diharapkan yaitu 2% V. Unsur C dalam hasil coran masing-masing spesimen menunjukkan kadar 0,62%; 0,42%; 0,48%; dan 0,72% berbeda dengan desain yang diharapkan yaitu 0,85% C. Salah satu faktor

utama yang menyebabkan naik-turunnya persentase unsur paduan dalam hasil coran adalah metode peleburan saat pemaduan dilakukan.

Dalam penelitian ini, metode peleburan menggunakan *Electric Arc Furnace* dengan furnace yang terbuat dari refraktori C1 (MgO, CaO, refraktori basa). Pada temperatur peleburan yang mencapai sekitar 1900°C, sebagian dinding furnace ikut meleleh. Sebagian logam cair menempel pada dinding furnace yang meleleh sehingga menyebabkan perubahan komposisi kimia paduan secara keseluruhan.

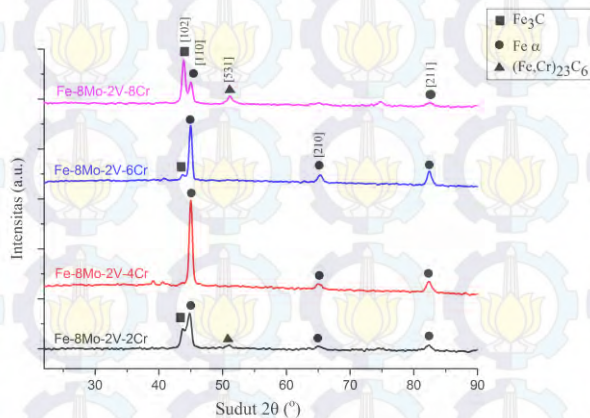
Tabel 4.3 Komposisi kimia baja kecepatan tinggi AISI M10 (ASTM A600)

	C	Mn	Si	P	S	Mo	V	Cr	Fe
Min	0,84	0,10	0,20	0,00	0,00	7,75	1,80	3,75	Bal.
Maks	0,95	0,40	0,45	0,03	0,03	8,50	2,20	4,50	

Desain komposisi kimia paduan Fe-Mo-V-Cr pada dasarnya ditentukan berdasarkan pendekatan terhadap komposisi kimia baja perkakas kecepatan tinggi AISI M10. Tabel 4.3 menunjukkan batas toleransi kadar unsur paduan pada baja kecepatan tinggi AISI M10 berdasarkan data ASTM A600. Toleransi kadar Mo, V, dan Cr pada baja kecepatan tinggi sesuai. Jika ditinjau dari unsur Mo, V, dan Cr, maka beberapa spesimen hasil coran menunjukkan kecocokan dengan standar. Jika ditinjau dari unsur C, keempat spesimen tidak masuk ke dalam standar yang mensyaratkan karbon dengan kadar 0,84-0,95% berat. Kadar karbon dalam paduan sulit terkontrol karena laju berkurangnya elektroda grafit yang digunakan selama proses peleburan tidak dapat terkontrol. Elektroda grafit berperan sebagai penyuplai karbon tambahan pada baja karbon menengah AISI 1045 untuk mencapai kriteria baja perkakas kecepatan tinggi AISI M10 sesuai standar ASTM A600.

4.3 Pengamatan Hasil XRD paduan Fe-Mo-V-Cr

Pengujian XRD dilakukan dengan menggunakan X-Ray Diffraction PANalytical dengan sudut 2θ $10^\circ - 90^\circ$, gelombang Cu K α sebesar 1.5406 Å. Analisa puncak dilakukan dengan menggunakan software PCPDF WIN dan PDF (Powder Diffraction File) 2 2011, untuk mencocokkan kartu PDF dengan puncak pada sampel. Gambar 4.2 menunjukkan perbandingan hasil pengujian XRD spesimen paduan Fe-Mo-V-Cr, diurutkan berdasarkan kadar kromium.



Gambar 4.2 Perbandingan hasil XRD berdasarkan kadar kromium dalam paduan Fe-Mo-V-Cr

Secara umum, dari hasil analisis XRD ditemukan empat senyawa yang terbentuk pada hasil coran paduan Fe-Mo-V-Cr. Keberadaan senyawa-senyawa tersebut ditunjukkan oleh lima puncak yang muncul. Data tersebut dihasilkan melalui proses pencocokan puncak XRD setiap spesimen yang tertera pada Lampiran D-1, D-2, D-3, D-4 dengan *database* XRD yang terdapat pada kartu PDF yang terdapat pada Lampiran D-5, D-6, D-7, dan D-8. Melalui analisis ini, fasa yang

muncul pada struktur mikro paduan Fe-Mo-V-Cr dapat diketahui.

Terdapat empat fasa yang terdeteksi, yaitu αFe , Fe_3C , dan $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$. Data hasil XRD menunjukkan bahwa puncak pertama 43,73 teridentifikasi sebagai Fe_3C (pdf nomor 00-034-0001). Fe_3C memiliki sistem kristal ortorombik dengan parameter kristal $a = 5,0915 \text{ \AA}$, $b = 6,7446 \text{ \AA}$, $c = 4,5276 \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ dan bidang kisi (102).

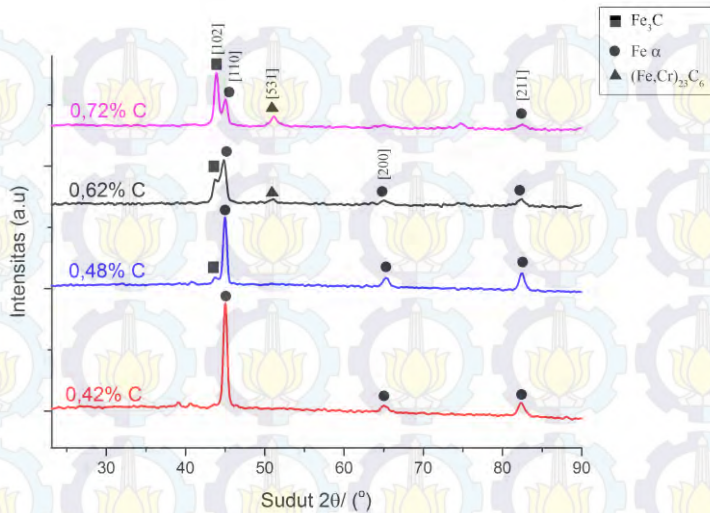
Sementara puncak kedua 45,06; puncak ketiga 82,35; puncak keempat 65,18 teridentifikasi sebagai αFe (pdf nomor 00-001-1267). αFe , ferit, memiliki sistem kristal *body centered cubic* dengan parameter kristal $a = b = c = 2,8607 \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Bidang kisi pada puncak 45,06 adalah (110), puncak 82,35 adalah (211), dan puncak 65,18 adalah (200).

Puncak kelima 50,92 teridentifikasi sebagai $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ (pdf nomor 01-078-1502). Karbida besi kromium ini memiliki rumus kimia $\text{Cr}_{15,58}\text{Fe}_{7,42}\text{C}_6$ dan struktur kristal *face centered cubic* (FCC) dengan parameter kristal $a = b = c = 10,5990 \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, dan bidang kisi (531).

Dari data puncak yang terdeteksi pada hasil pengujian XRD spesimen paduan Fe-Mo-V-Cr menunjukkan terdapat 2 puncak yang saling tumpang tindih (*overlap*) yaitu pada puncak 43,73 yang menunjukkan adanya Fe_3C dan puncak 43,65 yang menunjukkan adanya $(\text{Fe,Mo})_{23}\text{C}_6$.

Puncak 43.65 teridentifikasi sebagai $(\text{Fe,Mo})_{23}\text{C}_6$ (pdf nomor 01-075-8279). Karbida besi molibdenum ini memiliki rumus kimia $\text{Fe}_{21}\text{Mo}_2\text{C}_6$ dan struktur kristal *face centered cubic* (FCC) dengan parameter kristal $a = b = c = 10,7650 \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, dan bidang kisi (511).

Korelasi antara jumlah unsur paduan dengan fasa yang terbentuk pada hasil coran Fe-Mo-V-Cr dapat diamati melalui perubahan intensitas puncak hasil XRD. Untuk memudahkan interpretasi terhadap kecenderungan tersebut maka hasil XRD disusun berdasarkan kadar karbon paduan yang ditunjukkan oleh Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Perbandingan hasil XRD berdasarkan kadar karbon dalam paduan Fe-Mo-V-Cr

Dapat diamati dengan jelas melalui Gambar 4.3 bahwa semakin meningkat karbon maka terjadi perubahan intensitas puncak yang sangat signifikan. Intensitas puncak 43,73 Fe_3C dan puncak 43,65 $(\text{Fe,Mo})_{23}\text{C}_6$ semakin meningkat seiring naiknya kadar karbon. Keberadaan unsur karbon akan memicu unsur pembentuk karbida (Fe, Mo, V, dan Cr) membentuk senyawa karbida.

Intensitas pada puncak 50,94 $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ mulai muncul pada paduan Fe-8Mo-2V-2Cr dengan kadar karbon 0,62% berat dan intensitasnya meningkat pada paduan Fe-8Mo-2V-8Cr. Jumlah kromium dan karbon sangat menentukan pembentukan karbida ini. Kromium merupakan unsur pembentuk karbida (senyawa yang terbentuk oleh ikatan dengan karbon). Namun, afinitas kromium terhadap karbon lebih rendah daripada molibdenum (Avner. 1974). Sehingga unsur molibdenum dan besi akan mengikat karbon lebih awal

untuk membentuk karbida primer. Sedangkan karbida kromium akan muncul sebagai karbida sekunder ketika kadar karbon mencukupi.

Pada spesimen Fe-8Mo-2V-4Cr dan Fe-8Mo-2V-6Cr yang memiliki kadar karbon dibawah 0,5% berat, puncak yang menunjukkan keberadaan kromium tidak terdeteksi karena pada kondisi tersebut kromium larut ke dalam fasa ferit.

Sedangkan puncak 45,06, puncak 82,352, puncak 65,186 yang menunjukkan keberadaan α Fe (ferit) semakin menurun intensitasnya. Hal ini disebabkan oleh berkurangnya logam besi dalam ferit karena mengikat karbon untuk membentuk senyawa karbida.

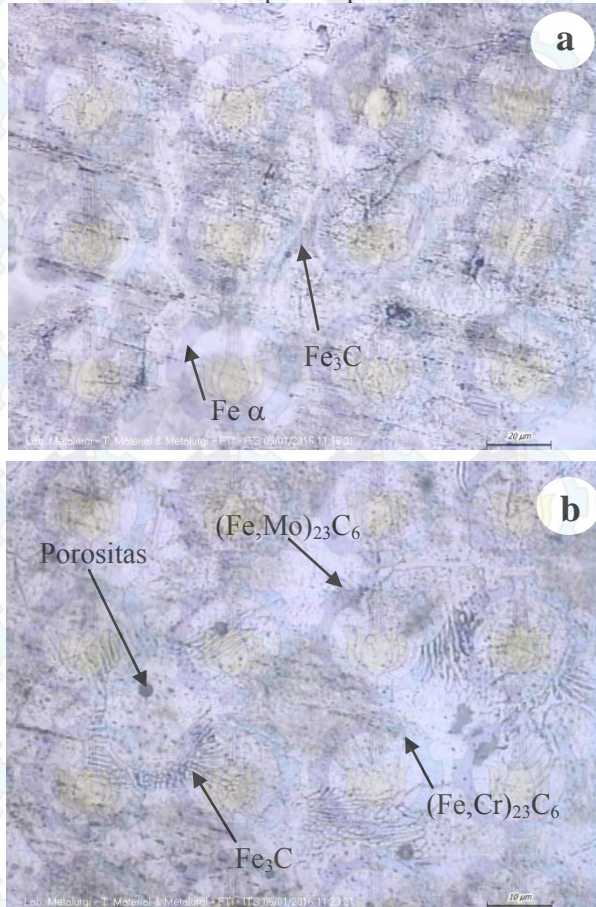
4.4 Pengamatan Struktur Mikro Coran

Pengujian Metalografi dilakukan sesuai standar ASTM E407. Larutan etsa yang digunakan untuk mengetahui struktur mikro secara umum pada baja perkakas adalah larutan nital. Larutan etsa dipreparasi dengan menambahkan 1-5 mL HNO_3 ke dalam 100 mL etanol / metanol 95%. Spesimen uji dicelupkan ke dalam larutan etsa selama beberapa detik.

Paduan Fe-Mo-V-Cr dengan kadar paduan kurang dari 10% berat dan kadar karbon diatas 0,4% berat akan membentuk fasa karbida pada batas butir dengan matriks ferit, martensit, atau bainit di bagian dalamnya. Sesuai dengan hasil analisis XRD, senyawa karbida yang terbentuk, antara lain: Fe_3C , $(\text{Fe},\text{Mo})_{23}\text{C}_6$, dan $(\text{Fe},\text{Cr})_{23}\text{C}_6$.

Hasil uji struktur mikro spesimen Fe-8Mo-2V-2Cr menunjukkan terbentuknya butir-butir kristal ferit dikelilingi oleh jaringan karbida yang berwarna putih. Pada Gambar 4.4a tampak fasa ferit berwarna terang di dalam butir. Berdasarkan Gambar 4.4c terlihat bahwa terdapat tiga tipe karbida yang terbentuk pada batas butir. Sementit ditunjukkan oleh struktur morfologi sirip. Sirip karbida disusun oleh plat-plat karbida Fe_3C yang saling berjajar. Karbida $(\text{Fe},\text{Mo})_{23}\text{C}_6$ terlihat

sebagai serabut halus yang membungkus sementit pada batas butir. Karbida $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ berbentuk jarum yang tidak beraturan di dalam matriks ferit. Secara mikro, beberapa porositas terdeteksi sebagai akibat dari terjebaknya udara dalam moltem metal ketika proses peleburan.

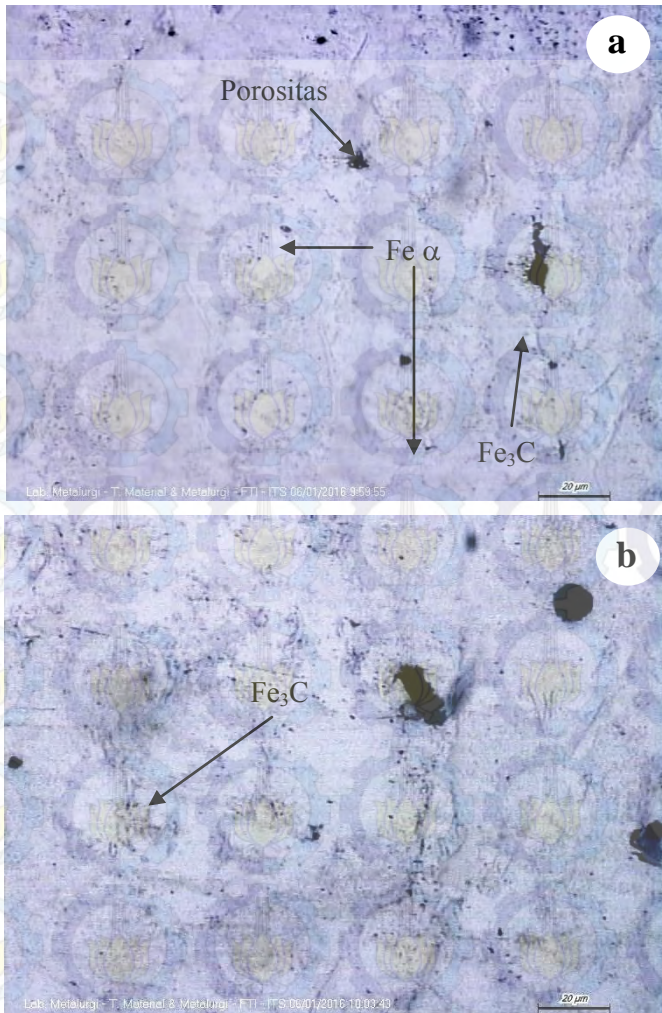


Gambar 4.4 Struktur Mikro Paduan Fe-8Mo-2V-2Cr
Perbesaran (a) 500 (b) 1000 kali

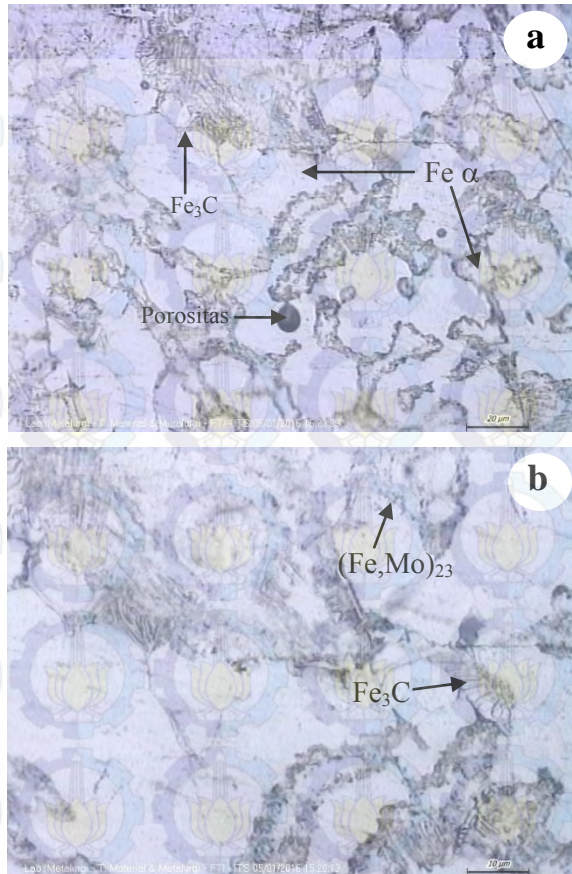
$M_{23}C_6$ dimana M adalah Fe dan Mo terbentuk melalui proses pengintian yang terjadi pada permukaan sentuh (*interface*) antara karbida primer dan matriks. Karbida $M_{23}C_6$ tumbuh dengan mengikat atom logam dari matriks dan mengambil karbon dari karbida primer (Wiengmoon dkk. 2008).

Spesimen Fe-8Mo-2V-4Cr adalah sampel dengan kadar karbon lebih rendah relatif terhadap spesimen lain, yaitu 0,42% berat karbon. Pada hasil uji struktur mikro, fasa yang terbentuk mayoritas adalah ferit dan sebagian kecil karbida primer. Karbida diidentifikasi sebagai sementit Fe_3C dan karbida besi molibdenum $(Fe,Mo)_{23}C_6$. Pada Gambar 4.6 tampak fasa ferit berwarna putih tersebar sebagai matriks dan di dalam batas butir karbida. Jarum-jarum karbida yang terbentuk sangat kecil dan jumlahnya sedikit sehingga tidak terdeteksi melalui analisis XRD.

Sedangkan spesimen Fe-8Mo-2V-6Cr adalah sampel dengan kadar karbon (0,42% berat C) lebih tinggi dibanding spesimen Fe-8Mo-2V-4Cr. Pada spesimen Fe-8Mo-2V-6Cr, hasil struktur mikro terbentuk fasa ferit, sementit, dan karbida besi molibdenum. Pada Gambar 4.7 tampak bahwa ferit tersebar sebagai matriks dan berada di dalam batas butir karbida. Struktur ini mirip dengan spesimen Fe-8Mo-2V-4Cr. Perbedaannya terletak pada keberadaan karbida yang lebih tebal yang menunjukkan jumlah karbida tersebut semakin tinggi. Hasil struktur mikro ini cocok dengan analisis XRD dimana intensitas peak karbida semakin tinggi. Karbida semakin banyak terbentuk disebabkan oleh kadar karbon yang meningkat.



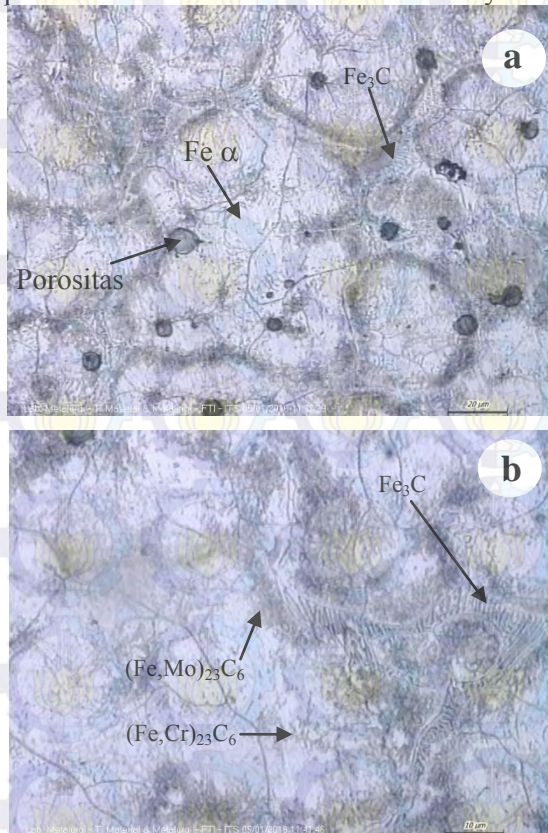
Gambar 4.5 Struktur Mikro Paduan Fe-8Mo-2V-4Cr
Perbesaran (a) 500 (b) 1000 kali



Gambar 4.6 Struktur Mikro Paduan Fe-8Mo-2V-6Cr
Perbesaran (a) 500 (b) 1000 kali

Spesimen Fe-8Mo-2V-8Cr adalah sampel dengan kadar karbon tertinggi 0,72% berat dan kadar kromium tertinggi pula 6,95% berat. Pada Gambar 4.8 menunjukkan terbentuknya fasa ferit dan tiga tipe karbida, yaitu sementit, karbida besi molibdenum, dan karbida besi kromium. Sementit yang berada di batas butir ditunjukkan oleh

morfologi bersirip. Sedangkan karbida besi molibdenum yang membungkus sementit memiliki morfologi serabut. Karbida sekunder besi kromium juga tampak berada di dalam matriks ferit. Struktur mikro specimen ini relatif sama dengan specimen Fe-8Mo-2V-2Cr. Perbedaannya terletak pada jumlah karbida primer dan sekunder. Specimen 8% Cr lebih memungkinkan terbentuk lebih banyak karena kadar unsur paduan pembentuk karbida dan karbon lebih banyak.



Gambar 4.7 Struktur Mikro Paduan Fe-8Mo-2V-8Cr
Perbesaran (a) 500 (b) 1000 kali

Mekanisme terbentuknya karbida besi kromium terjadi pada proses pendinginan. Kromium tidak melakukan pengintian di dalam dan hanya tumbuh bersama dendrit yang dimulai dari permukaan. Adanya tegangan yang dihasilkan oleh perbedaan koefisien muai karbida dan matriks menyebabkan unsur kromium dalam austenit tidak stabil. Unsur kromium kemudian keluar membentuk presipitat dalam bentuk karbida sekunder. Ketika pendinginan selesai, karbida sekunder ini berada di dalam matriks (Liu dkk. 2001).

4.3 Nilai Kekerasan Paduan Fe-Mo-V-Cr

Pengujian kekerasan hasil coran dilakukan dengan menggunakan metode uji kekerasan rockwell C dengan standar ASTM E18. Indentor berupa kerucut intan dengan sudut puncak 120 derajat dan beban uji sebesar 147.5 kgf.

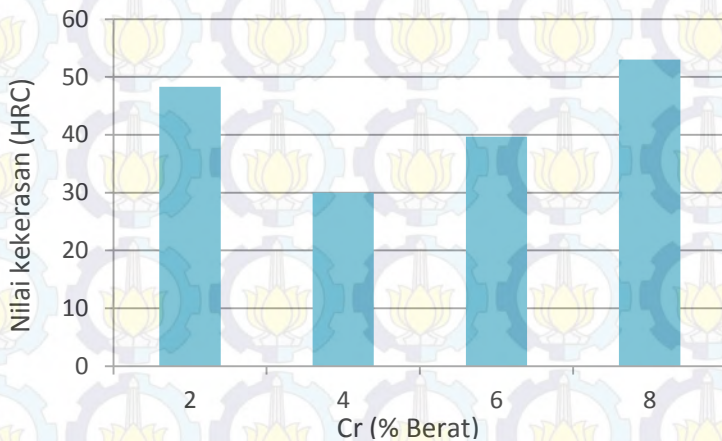
Tabel 4.4 menunjukkan perbandingan nilai kekerasan pada keempat spesimen paduan Fe-Mo-V-Cr dengan kadar kromium yang berbeda. Setiap spesimen diuji kekerasan sebanyak 3 titik yang berbeda. Sehingga dihasilkan 3 nilai kekerasan Rockwell C untuk setiap spesimen. Perhitungan nilai kekerasan skala Rockwell C diperoleh dari rata-rata nilai kekerasan dan standar deviasi setiap spesimen uji.

Tabel 4.4 Nilai kekerasan paduan Fe-Mo-V-Cr

Spesimen	Kekerasan (HRC)
Fe-8Mo-2V-2Cr	48 ± 1
Fe-8Mo-2V-4Cr	30 ± 2
Fe-8Mo-2V-6Cr	39 ± 1
Fe-8Mo-2V-8Cr	53 ± 1

Gambar 4.8 menunjukkan kecenderungan nilai kekerasan Rockwell C meningkat seiring dengan bertambahnya presentase karbon dalam paduan. Spesimen Fe-8Mo-2V-2Cr dengan kadar karbon 0,62% berat memiliki nilai kekerasan

sebesar 48 HRC. Spesimen Fe-8Mo-2V-4Cr dengan kadar karbon 0,42% berat memiliki nilai kekerasan sebesar 30 HRC. Spesimen Fe-8Mo-2V-6Cr dengan kadar karbon 0,48% berat memiliki nilai kekerasan sebesar 39 HRC. Sementara spesimen Fe-8Mo-2V-8Cr dengan kadar karbon 0,72% berat memiliki nilai kekerasan sebesar 53 HRC.



Gambar 4.8 Nilai Kekerasan

Perubahan nilai kekerasan terlihat sangat signifikan berhubungan dengan komposisi kimia unsur paduan kromium dan karbon. Penurunan nilai kekerasan Rockwell C yang ekstrim terjadi pada spesimen Fe-8Mo-2V-2Cr menuju spesimen Fe-8Mo-2V-4Cr, yaitu sebesar 37,5%. Penurunan nilai kekerasan ini disebabkan karena karbida logam Cr dan Mo terbentuk pada spesimen 2% berat Cr dan tidak terbentuk pada spesimen 4% berat Cr. Karbida logam Fe, Mo, dan Cr terbentuk pada spesimen Fe-8Mo-2V-2Cr karena keberadaan karbon yang cukup yaitu 0,62% berat. Karbida logam yang terbentuk sesuai dengan analisis XRD yang menunjukkan keberadaan karbida Fe_3C , $\text{Fe}_{21}\text{Mo}_2\text{C}_6$, dan $\text{Cr}_{15,58}\text{Fe}_{7,42}\text{C}_6$. Sesuai dengan struktur mikro yang terbentuk pada spesimen

Fe-8Mo-2V-2Cr adalah fasa ferit di dalam batas butir karbida Fe_3C dan $(\text{Fe},\text{Mo})_{23}\text{C}_6$ serta karbida sekunder $(\text{Fe},\text{Cr})_{23}\text{C}_6$ muncul pada matriks ferit. Karbida logam Cr dan Mo tidak terbentuk pada spesimen Fe-8Mo-2V-4Cr karena kadar karbon yang rendah yaitu 0,42% berat. Sesuai dengan analisis XRD bahwa pada spesimen Fe-8Mo-2V-4Cr hanya muncul puncak ferit dan tidak muncul puncak baik karbida Fe_3C maupun karbida M_{23}C_6 dimana M adalah Fe, Mo, atau Cr. Data tersebut diperkuat dengan gambar struktur mikro yang terbentuk pada spesimen Fe-8Mo-2V-4Cr bahwa fasa yang mendominasi adalah fasa ferit. Jumlah karbida yang besar menyumbangkan nilai kekerasan yang tinggi. Nilai kekerasan karbida besi adalah 300-400 HV, karbida molibdenum adalah 1500 HV, sementara karbida kromium sekunder M_{23}C_6 adalah 1000 HV (Wiengmoon. 2008). Sedangkan kekerasan ferit hanya 80 HV (Avner. 1974). Jadi penurunan nilai kekerasan pada spesimen Fe-8Mo-2V-2Cr menuju spesimen Fe-8Mo-2V-4Cr dapat terjadi karena hilangnya karbida Fe, Mo, dan Cr serta menurunnya jumlah karbida Fe_3C .

Peningkatan nilai kekerasan Rockwell C spesimen Fe-8Mo-2V-4Cr dan Fe-8Mo-2V-6Cr adalah sebesar 30%. Mekanisme peningkatan nilai kekerasan pada spesimen paduan Fe-Mo-V-Cr adalah melalui mekanisme pembentukan karbida. Jumlah karbida pada spesimen 6% Cr lebih besar daripada spesimen 4% Cr karena kadar karbon yang lebih banyak 0,48% berat C. Sedangkan kromium pada spesimen 6% berat Cr berperilaku melakukan mekanisme *solid solution hardening* (Creese. 1999). Kromium dalam paduan Fe-Mo-V-Cr dengan kadar karbon relatif rendah akan larut dalam fasa ferit yang jumlahnya lebih banyak sesuai dengan diagram fasa Fe-Cr yang dinyatakan bahwa kromium memiliki kelarutan tak terbatas dalam ferit. Karena ukuran atom kromium dan besi hampir sama ($\text{Cr} = 0,125\text{nm}$ dan $\text{Fe} = 0,124\text{nm}$), kromium melakukan substitusi terhadap besi pada titik kisi tertentu. Hal ini menyebabkan adanya distorsi pada struktur

kristal BCC besi. Distorsi merupakan daerah yang tegang. Sehingga proses slip pada bidang kristalografi atom (deformasi) semakin sulit terjadi pada paduan. Hal ini mengindikasikan material lebih kuat dan keras menahan deformasi akibat pembebanan seragam maupun terpusat (Avner. 1974).

Peningkatan nilai kekerasan Rockwell C spesimen Fe-8Mo-2V-6Cr dan Fe-8Mo-2V-8Cr adalah sebesar 10%. Peningkatan kekerasan pada paduan Fe-Mo-V-Cr dengan kadar karbon yang cukup tinggi (0,48% - 0,72% berat) adalah melalui mekanisme pembentukan senyawa karbida. Senyawa karbida memiliki struktur kristal berbeda dengan unsur pembentuknya. Perilaku besi dan kromium dengan adanya keberadaan karbon yang cukup akan membentuk karbida sekunder yang $\text{Cr}_{15,58}\text{Fe}_{7,42}\text{C}_6$ dengan struktur kristal FCC. Karena karbon memiliki ukuran atom relatif kecil ($C = 0,071 \text{ nm}$), karbon masuk ke dalam kristal logam secara interstisi dan berikatan logam dengan Fe dan Cr. Sifat mekanik struktur kristal ini sangat keras karena *packing factor* lebih tinggi / lebih kompak dari pada BCC. Nilai kekerasan M_{23}C_6 sebagai karbida sekunder dimana M adalah Cr dan Fe adalah 1000 HV (Wiengmoon. 2008).

Jumlah, ukuran, dan distribusi senyawa karbida yang bermacam-macam dalam matriks yang dapat dikeraskan merupakan fitur penting dalam baja perkakas kecepatan tinggi. Keberadaan karbida berpengaruh pada nilai kekerasan dan ketahanan material terhadap pelunakan pada temperatur tinggi (Xuefeng. 2012).



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah :

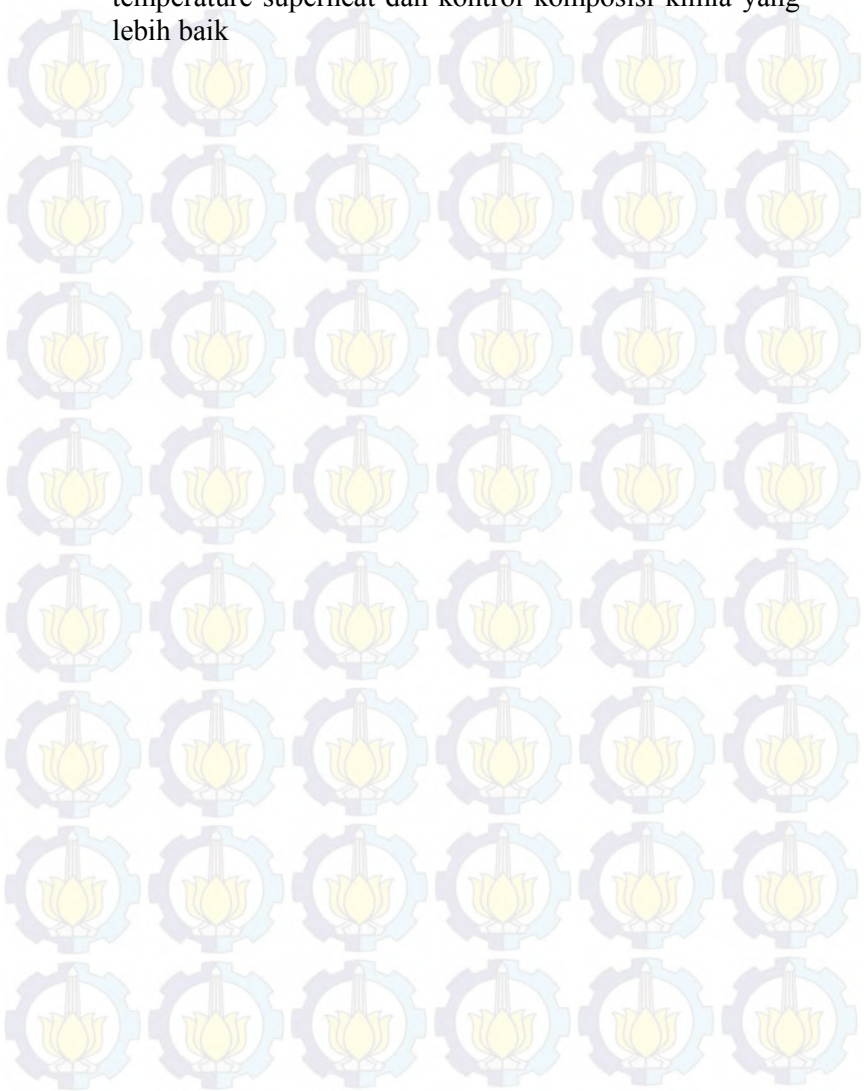
1. Penambahan kromium (Cr) pada AISI M10 paduan Fe-Mo-V-Cr dapat mempengaruhi struktur mikro dengan membentuk fasa karbida $M_{23}C_6$ (M adalah Fe, Mo, dan Cr), sementit, dan fasa ferit. Dengan bertambahnya unsur pembentuk karbida dengan jumlah karbon yang cukup maka batas butir yang berisi karbida semakin tebal dan terbentuk karbida sekunder di dalam matriks ferit, sedangkan fasa ferit semakin berkurang.
2. Peningkatan kadar kromium (Cr) pada AISI M10 paduan Fe-Mo-V-Cr dapat meningkatkan nilai kekerasan. Peningkatan nilai kekerasan terjadi melalui mekanisme *solid solution hardening* dan mekanisme pembentukan karbida.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan :

1. Menggunakan variabel dimensi dan distribusi karbida, mencetak pahat bubut sebenarnya, serta mengkarakterisasi sifat tribologi material (koefisien gesek, keausan, dan pelumasan)
2. Untuk tidak melebur baja dengan furnace bakar karena temperatur yang dicapai hanya 1300°C dan tidak menggunakan krusibel grafit karena difusi karbon pada molten metal sulit dikontrol
3. Menggunakan *electric arc furnace* (EAF) dengan elektroda grafit kemudian diberi perlakuan *decarburization* atau mengganti elektroda grafit untuk menghindari masuknya patahan karbon ke dalam *molten metal*.

4. Menggunakan furnace induksi untuk mencapai temperature superheat dan kontrol komposisi kimia yang lebih baik



Daftar Pustaka

- _____. 1990. *ASM Handbook Volume 1. Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys*. USA: ASM International
- _____. 1990. *ASM Handbook Volume 3. Alloys Phase Diagrams*. USA: ASM International
- _____. 1990. *ASM Handbook Volume 9. Metallography and Microstructure*. USA: ASM International
- Abbaschian, Reza dkk. 2009. *Physical Metallurgy Principles 4th Edition*. Stamford: Cengage Learning
- Avner, S. H. (1974). *Introduction to Physical Metallurgy*. New York: McGraw-Hill International Book Company.
- B. Fultz, J. Howe. 2013. *Transmission Electron Microscopy and Diffractometry of Materials*. Berlin: Springer
- Barkalow, R. H dkk. 1972. *Solidification of M2 High Speed Steel*. Metallurgical Transactions Vol. 3
- Beeley, Peter. 2001. *Foundry Technology*. Oxford: Butterworth-Heinemann
- Callister, William D dan David G Rethwisch. 2010. *Materials Science and Engineering an Introduction 8th Edition*. USA: John Wiley & Sons
- Creese, Robert C. 1999. *Introduction to manufacturing process and materials*. New York: Marcel Deker
- Davim, JP. 2014. *Machining of Titanium Alloys, Materials Forming, Machining, And Tribology*. Berlin: Springer
- Davis, Joseph R. 1995. *ASM Speciality Handbook: Tool Materials*. USA: ASM International
- Durand, Madeleine. 2004. *Microstructure of Steels and Cast Irons*. Berlin: Springer
- Groover, Mikell P. 2010. *Fundamental of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems 4th Edition*. USA: John Wiley & Sons

- Higgins, Raymond A. 1993. *Engineering Metallurgy: Applied Physical Metallurgy 6th Edition*. New York: Arnold
- Honeycombe, Robert dan HKDH Bhadeshia. 1995. *Steels Microstructure and Properties*. London: Edward Arnold
- Kalpakjian, Serope dan Steven R Schmid. 2009. *Manufacturing Engineering and Technology 6th edition*. Singapura: Pearson
- Krauss, George. 2005. *Steel Processing, Structure, and Performance*. USA: ASM International
- Khvan, Alexandra V. (2014). *A Thermodynamic Evaluation of the Fe-Cr-C System*. Calphad Elsevier, 24-33
- Lagowski, JJ. 2004. *Chemistry: Foundations and Applications*. USA: Macmillan Thomas Gale
- Minggui, QU dkk. 2013. *Effects of mischmetal addition on phase transformation and as-cast microstructure characteristics of M2 high-speed steel*. Journal of Rare Earth vol. 31, No. 6
- Nayan, Nafarizal dkk. 2009. *An Introduction to Optical Emission Spectroscopy and Lase-Aided Spectroscopy Techniques for Low-Temperature Plasma Analyses*. Proceeding of MUCEET. Pahang, 20-22 Juni
- Robert, George dkk. 1998. *Tool Steels: 5th Edition*. USA: ASM International
- Smith, William F.. 1993. *Structure And Properties of Engineering Alloys*. USA: McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Wiengmoon dkk. 2008. *Electron Microscopy and Hardness Study of Semi-Solid Processed 27wt% Cr Cast Iron*. Materials Science and Engineering. Vol 480, 333-341
- Xuefeng, Zhou. 2012. *Influence of rare earths on eutectic carbides in AISI M2 high speed steel*. Journal of Rare Earth vol. 30, No. 10

A-2 FerroChrome

CERTIFICATE OF ANALYSIS AND WEIGHT

Our Invoice No. : X 489

Order No. : n0114000243

Material : Low Carbon Ferro Chrome 010

Size : 10 - 50mm (90% min.)

We hereby certify that the weight and the chemical analysis of the above material is as follows:-

Chemical Analysis:

Cr	: 69.00%
C	: 0.067%
Si	: 0.90%
S	: 0.010%
P	: 0.028%

Weight: 25,000 mt nett in 1 metric ton bulk bags.

Sailing ex Vostochny to Jakarta per 'Hyundai Future' Voy. 472 on 4 - September 2014.

For and on behalf of
INNOMET

A-3 FerroMolibdenum

Commodity : FERRO MOLYBDENUM
Loading Port : BUSAN, SOUTH KOREA
L/C No. : -

Quantity : 20,000 KGS
Destination Port :
Vessel Name :
KM130722MA (9,000KGS)

* Quality and Size

1) LOT NO.: KM130722MB - 11,000KGS /

Mo	60.73%	Cu	0.38%
Si	1.20%	P	0.04%
C	0.08%	S	0.05%

2) LOT NO.: KM130722MA - 9,000KGS /

Mo	59.58%	Cu	0.41%
Si	1.05%	P	0.04%
C	0.08%	S	0.05%

SIZE : 10-30MM(90% MIN)

* Weight

PER BIG BAG NET WEIGHT	250.0 KGS
NET BIG BAG WEIGHT	3.10 KGS
TOTAL TARE WEIGHT	608.0 KGS
TOTAL NET WEIGHT	20,000.0 KGS
TOTAL GROSS WEIGHT	20,608.0 KGS

KORVAN IND. CO., L

YONG-KI LEE/PRESIDENT



A-4 FerroVanadium

Date: March 26, 2012

To: PT. MAKMUR META GRAHA DINAMIKA
JL. RUA MALAKA SELATAN NO. 28/10 JAKARTA 11230 INDONESIA

Contract No.: KV120312-V3377

Lot No.: KV120326

Commodity: FERRO VANADIUM

Quantity: 2,000 KGS

Loading Port: BUSAN PORT, KOREA

Destination Port: JAKARTA PORT, INDONESIA

L/C No. & Date: M17106057709 & March 15, 2012

Vessel Name: CITY OF SHANGHAI 0013W

HS Number: 7202.92.00.00

* Quality and Size

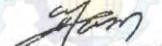
V	80.07%	C	0.09%
S	0.05%	P	0.03%
Si	0.90%	Al	0.59%

SIZE: 10-50MM(90% MIN)

* Weight

PER STEEL DRUM NET WEIGHT	250.0 KGS
NET STEEL DRUM WEIGHT	7.60 KGS
TOTAL TARE WEIGHT	88.80 KGS
TOTAL NET WEIGHT	2,000.0 KGS
TOTAL GROSS WEIGHT	2,088.80 KGS

KORVAN IND. CO., LTD.


YONG-KI, LEE / PRESIDENT

SIGNED BY PRODUCER
KORVAN IND. CO., LTD.

Lampiran B: Perhitungan Komposisi Paduan

B-1 Paduan Fe-8Mo-2V-2Cr

Bahan Baku	Komposisi Bahan Lebur									Jumlah (gram)	Jumlah (%)	Kontribusi terhadap Paduan								
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V			Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
AISI 1045	98.52	0.50	0.21	0.74	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	24.17	80.91	79.71	0.40	0.17	0.60	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
FeMo	37.90	0.08	1.20	0.00	0.04	0.05	0.00	60.73	0.00	3.95	13.23	5.01	0.01	0.16	0.00	0.01	0.01	0.00	8.03	0.00
FeV	18.83	0.09	0.96	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	80.07	0.75	2.51	0.47	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.01
FeCr	29.99	0.07	0.90	0.00	0.03	0.01	69.00	0.00	0.00	0.87	2.91	0.87	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	2.01	0.00	0.00
C (elektroda)	0.00	99.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.45	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Subtotal										29.88	100.00	86.07	0.86	0.38	0.60	0.01	0.01	2.02	8.03	2.01

B-2 Paduan Fe-8Mo-2V-4Cr

Bahan Baku	Komposisi Bahan Lebur									Jumlah (gram)	Jumlah (%)	Kontribusi terhadap Paduan									
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V			Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	
AISI 1045	98.52	0.50	0.21	0.74	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	23.30	78.00	76.84	0.39	0.16	0.58	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	
FeMo	37.90	0.08	1.20	0.00	0.04	0.05	0.00	60.73	0.00	3.95	13.23	5.01	0.01	0.16	0.00	0.01	0.01	0.00	8.03	0.00	
FeV	18.83	0.09	0.96	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	80.07	0.75	2.51	0.47	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.01	
FeCr	29.99	0.07	0.90	0.00	0.03	0.01	69.00	0.00	0.00	1.74	5.82	1.75	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	4.02	0.00	0.00	
C (elektroda)	0.00	99.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.46	0.00	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Subtotal										29.88	100.01	84.07	0.87	0.40	0.58	0.01	0.01	4.03	8.03	2.01	

B-3 Paduan Fe-8Mo-2V-6Cr

Bahan Baku	Komposisi Bahan Lebur										Jumlah (gram)	Jumlah (%)	Kontribusi terhadap Paduan									
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Fe			C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V		
AISI 1045	98.52	0.50	0.21	0.74	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	22.44	75.09	73.98	0.38	0.16	0.56	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00		
FeMo	37.90	0.08	1.20	0.00	0.04	0.05	0.00	60.73	0.00	3.95	13.23	5.01	0.01	0.16	0.00	0.01	0.01	0.00	8.03	0.00		
FeV	18.83	0.09	0.96	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	80.07	0.75	2.51	0.47	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.01		
FeCr	29.99	0.07	0.90	0.00	0.03	0.01	69.00	0.00	0.00	2.61	8.73	2.62	0.01	0.08	0.00	0.00	0.00	6.02	0.00	0.00		
C (elektroda)	0.00	99.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.48	0.00	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Subtotal										29.89	100.03	82.08	0.87	0.42	0.56	0.01	0.01	6.04	8.03	2.01		

B-4 Paduan Fe-8Mo-2V-8Cr

Bahan Baku	Komposisi Bahan Lebur									Jumlah (gram)	Jumlah (%)	Kontribusi terhadap Paduan									
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V			Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	
AISI 1045	98.52	0.50	0.21	0.74	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	21.57	72.18	71.11	0.36	0.15	0.53	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	
FeMo	37.90	0.08	1.20	0.00	0.04	0.05	0.00	60.73	0.00	3.95	13.23	5.01	0.01	0.16	0.00	0.01	0.01	0.00	8.03	0.00	
FeV	18.83	0.09	0.96	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	80.07	0.75	2.51	0.47	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.01	
FeCr	29.99	0.07	0.90	0.00	0.03	0.01	69.00	0.00	0.00	3.48	11.64	3.49	0.01	0.10	0.00	0.00	0.00	8.03	0.00	0.00	
C (elektroda)	0.00	99.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.49	0.00	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Subtotal										29.89	100.04	80.09	0.87	0.44	0.53	0.01	0.01	8.05	8.03	2.01	

Lampiran C: Hasil Pengujian OES

C-1 Paduan Fe-8Mo-2V-2Cr



barata indonesia
PT. BARATA

UNIT FOUNDRY GRESIK

Chemical Results

Sample No : 01

Customer :

Furnace :

Name of Equipment :

AISI M10 2Cr

Heat No. :

Order No. :

Lab. No :

22122015/00

Material :

Spektralanalyzer Foundry-MASTER

Grade :

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
86,7	0,621	0,270	0,298	0,0300	0,0275	2,01	8,44	0,0145
Ave 86,7	0,621	0,270	0,298	0,0300	0,0275	2,01	8,44	0,0145
Al	Co	Cu	Se	Ti	V	W	Zn	
1 < 0,0050	0,0079	0,0649	0,0057	< 0,0050	1,34	0,0463	0,0052	
Ave < 0,0050	0,0078	0,0649	0,0057	< 0,0050	1,34	0,0463	0,0052	

Town
Gresik

Date
22/12/2015

Tester
Firmansyah

QC. Manager
Ribut Setiawan, ST

Jl. VETERAN No. 241 - GRESIK 61123
Telp. (031) 3990555 Fax. (031) 3990666
Web: www.barata.co.id e-mail: info@barata.co.id

C-2 Paduan Fe-8Mo-2V-4Cr



barata indonesia
PT. BARATA INDONESIA

UNIT FOUNDRY GRESIK

Chemical Results

Sample No : 02

Customer :

Furnace :

Name of Equipment :

AISI M10 4%Cr

Heat No :

Order No :

Lab. No : 22122015/00

Material :

Spektoanalyzer Foundry-MASTER

Grade :

Fe
1 85,3
Ave 85,3

C
0,424
0,424

Si
0,441
0,441

Mn
0,196
0,196

P
0,0221
0,0221

S
0,0149
0,0149

Cr
3,75
3,75

Mo
7,70
7,70

Ni
0,0320
0,0320

Al
1 < 0,0050
Ave < 0,0050

Co
0,0089
0,0089

Cu
0,0759
0,0759

Nb
< 0,0050
< 0,0050

Ti
< 0,0050
< 0,0050

V
1,83
1,83

W
0,0406
0,0406

Pb
< 0,0050
< 0,0050

Town
Gresik

Date
22/12/2015

Tester
Firmansyah

QC. Manager
Ribut Setiawan, ST

Jl. VETERAN No. 241 GRESIK 61123
Telp. (031) 3990555 Fax. (031) 3990666
Web: www.barata.co.id e-mail: info@barata.co.id

C-3 Paduan Fe-8Mo-2V-6Cr



barata indonesia PT. (193830)

UNIT FOUNDRY GRESIK

Chemical Results

Sample No : AISI M10 6% Cr

Customer :

Furnace :

Name of Equipment :

Heat No :

Order No :

Lab. No :

28122015/02

Material :

Spektroanalyzer Foundry-MASTER

Grade :

Fe

C

Si

Mn

P

S

Cr

Mo

Ni

↓

0,491

0,599

0,273

0,0470

< 0,0007

5,95

7,07

0,0526

Ave

0,481

0,599

0,273

0,0470

< 0,0007

5,95

7,07

0,0526

Al

Cu

Cu

Rb

Ti

V

W

3P

↓

0,0148

0,0103

0,0802

0,0372

0,0023

1,69

0,0567

0,0072

Ave

0,0148

0,0103

0,0802

0,0372

0,0023

1,69

0,0567

0,0072

Town

Date

Tester

QC. Manager

Gresik

28/12/2015

Agung Setiawan

Ribut Seliawan ST

Jl. VETERAN No. 241 GRESIK 61123

Telp. (031) 3990555 Fax. (031) 3990666

Web: www.barata.co.id e-mail: info@barata.co.id

C-4 Paduan Fe-8Mo-2V-8Cr



barata indonesia PT (PUSKES)

UNIT FOUNDRY GRESIK

Chemical Results

Sample No : AISI M10 8% Cr

Customer :

Furnace :

Name of Equipment :

Heat No :

Order No :

Lab No :

28122015/01

Material :

Spekโตรanalyzer Foundry-MASTER

Grade :

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
80,8	0,721	0,779	0,180	0,0473	0,0033	6,95	8,21	0,0571
Avg 80,8	0,721	0,779	0,180	0,0473	0,0033	6,95	8,21	0,0571

Al	Co	Cu	Nb	Te	V	W	Bi
< 0,0005	0,0105	0,0737	0,0393	0,0011	1,97	0,0412	0,0070
Avg < 0,0005	0,0105	0,0737	0,0393	0,0011	1,97	0,0412	0,0070

Town
Gresik

Date
28/12/2015

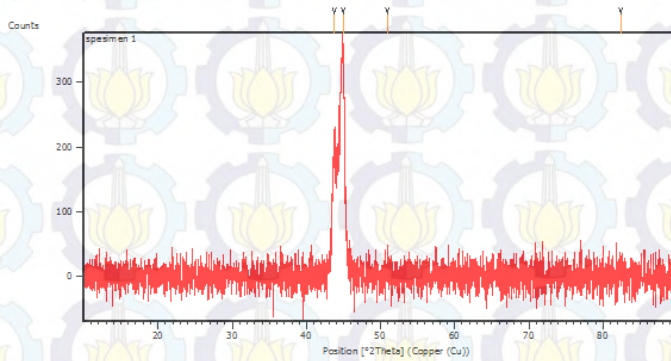
Tester
Agung Seliawan

QC. Manager
Ribul Seliawan ST

Jl. VETERAN No. 241 GRESIK 61123
Telp. (031) 3990555 Fax. (031) 3990666
Web: www.barata.co.id e-mail: info@barata.co.id

Lampiran D: Hasil Pengujian XRD

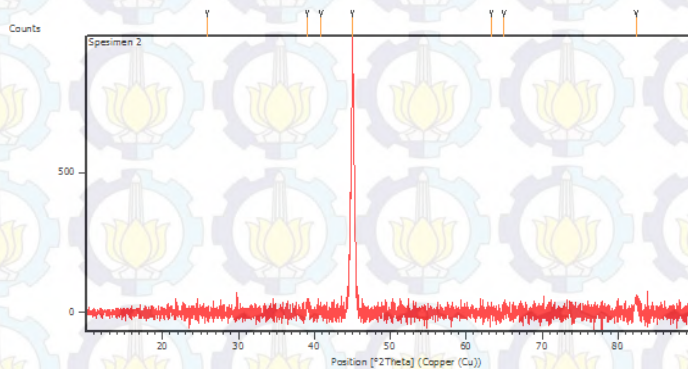
D-1 Paduan Fe-8Mo-2V-2Cr



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.7333	186.37	0.3346	2.06992	56.79
44.9451	328.17	0.4684	2.01689	100.00
50.9486	27.64	0.8029	1.79243	8.42
82.4091	48.65	0.8029	1.17030	14.83

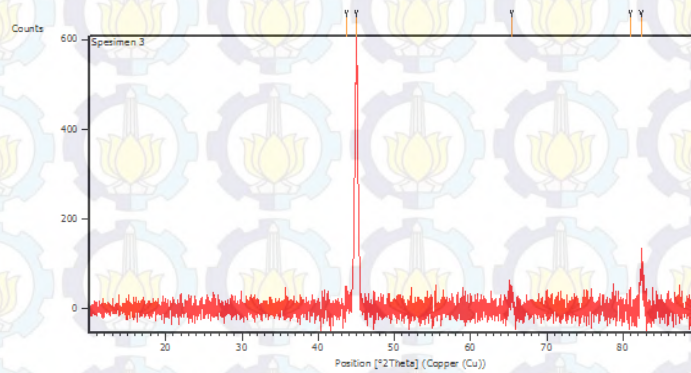
D-2 Paduan Fe-8Mo-2V-4Cr



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
25.8938	6.11	0.2676	3.44095	0.66
38.9981	48.53	0.4015	2.30964	5.23
40.8280	25.70	0.8029	2.21025	2.77
44.9892	927.18	0.3011	2.01502	100.00
63.3351	23.29	0.1004	1.46848	2.51
64.9807	55.25	0.5353	1.43522	5.96
82.3525	111.73	0.5353	1.17096	12.05

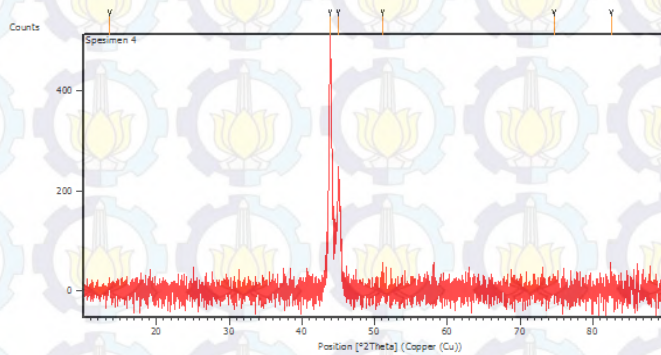
D-3 Paduan Fe-8Mo-2V-6Cr



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.6867	52.88	0.4015	2.07202	8.35
44.9729	633.17	0.3011	2.01570	100.00
65.4320	70.36	0.6691	1.42641	11.11
80.9415	33.27	0.2342	1.18778	5.26
82.4154	150.53	0.3346	1.17023	23.77

D-4 Paduan Fe-8Mo-2V-8Cr



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
13.5719	21.98	0.2007	6.52447	4.49
43.8956	489.17	0.3680	2.06264	100.00
44.9946	237.71	0.1673	2.01479	48.60
51.1575	68.39	0.4684	1.78561	13.98
74.6606	34.85	0.8029	1.27132	7.12
82.5288	34.46	0.8029	1.16891	7.04

D-5 PDF CARD 00-034-0001

Name and formula

Reference code: 00-034-0001

Mineral name: Cohenite, syn
Compound name: Iron Carbide
Common name: cementite

Empirical formula: CFe_3

Chemical formula: Fe_3C

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta(deg)	I (%)
1	2	0	0	2.54700	35.208	2.0
2	1	2	1	2.38700	37.653	25.0
3	2	1	0	2.38100	37.752	35.0
4	0	0	2	2.26400	39.783	40.0
5	2	0	1	2.21900	40.625	35.0
6	2	1	1	2.10800	42.867	80.0
7	1	0	2	2.06800	43.738	100.0
8	2	2	0	2.03200	44.554	45.0
9	0	3	1	2.01400	44.974	45.0
10	1	1	2	1.97750	45.851	65.0
11	1	3	1	1.87300	48.569	20.0
12	2	2	1	1.85400	49.099	45.0
13	1	2	2	1.76350	51.800	14.0
14	2	3	0	1.68520	54.400	12.0
15	0	4	0	1.68520	54.400	12.0
16	2	1	2	1.64160	55.970	10.0
17	3	0	1	1.58960	57.971	25.0
18	3	1	1	1.54740	59.709	8.0
19	2	2	2	1.51190	61.260	10.0
20	1	2	3	1.32990	70.791	10.0
21	3	1	2	1.32990	70.791	10.0
22	4	0	1	1.22560	77.880	14.0
23	1	3	3	1.21680	78.552	8.0
24	4	1	1	1.20520	79.456	4.0

Crystallographic parameters

Crystal system: Orthorhombic

Space group: Pnma

Space group number: 62

a (Å): 5.0915

b (Å): 6.7446

c (Å): 4.5276

Alpha (°): 90.0000

Beta (°): 90.0000

Gamma (°): 90.0000

Calculated density (g/cm^3): 7.67

Measured density (g/cm^3): 7.20

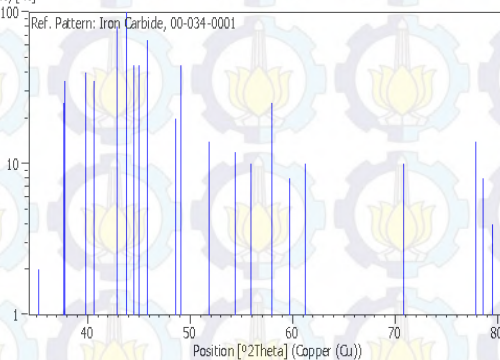
Volume of cell (10^{-6} nm^3): 155.48

Z: 4.00

Stick Pattern

Intensity [%]

Ref. Pattern: Iron Carbide, 00-034-0001



D-6 PDF CARD 00-002-1267

Name and formula

Reference code: 00-001-1267

Compound name: Iron

Empirical formula: Fe

Chemical formula: Fe

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic

Space group: Im-3m

Space group number: 229

a (Å):

2.8607

b (Å):

2.8607

c (Å):

2.8607

Alpha (°):

90.0000

Beta (°):

90.0000

Gamma (°):

90.0000

Measured density (g/cm³):

7.87

Volume of cell (10⁻⁶ pm³):

23.41

Z:

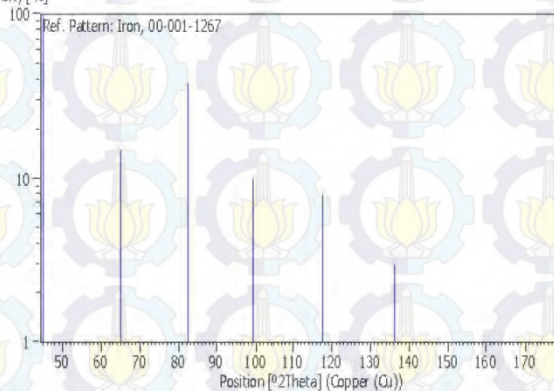
2.00

Peak list

No.	h	k	l	d (Å)	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	2.01000	45.068	100.0
2	2	0	0	1.43000	65.186	15.0
3	2	1	1	1.17000	82.352	38.0
4	2	2	0	1.01000	99.401	10.0
5	3	1	0	0.90000	117.716	8.0
6	2	2	2	0.83000	136.273	3.0
7	3	2	1	0.76000	150.100	10.0
8				0.68000	170.300	3.0

Stick Pattern

Intensity [%]



D-7 PDF CARD 01-078-1502

Name and formula

Reference code: 01-078-1502
Mineral name: Isovite, ferrian, syn
Compound name: Chromium Iron Carbide
Common name: $\gamma\text{-Cr}_{15.58}\text{Fe}_{7.42}\text{C}_6$
Empirical formula: $\text{C}_6\text{Cr}_{15.58}\text{Fe}_{7.42}$
Chemical formula: $\text{Cr}_{15.58}\text{Fe}_{7.42}\text{C}_6$

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
Space group: $\text{Fm}\bar{3}\text{m}$
Space group number: 225

a (Å): 10.5990
b (Å): 10.5990
c (Å): 10.5990
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000

Volume of cell (10^{-6} pm^3): 1190.68
Z: 4.00

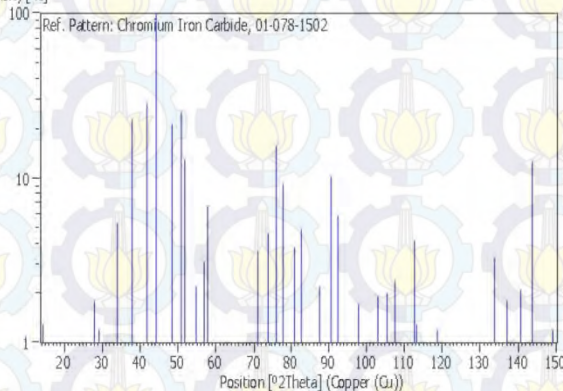
Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	6.11930	14.463	1.3
2	2	0	0	5.29950	16.715	0.1
3	2	2	0	3.74790	23.725	0.4
4	3	1	1	3.19570	27.696	1.6
5	2	2	2	3.05970	29.163	1.2
6	4	0	0	2.64980	33.800	5.3
7	3	3	1	2.43160	36.937	0.9
8	4	2	0	2.37000	37.934	23.0
9	4	2	2	2.16350	41.715	28.4
10	3	3	3	2.03980	44.375	100.0
11	4	4	0	1.87370	48.549	21.3
12	5	3	1	1.79160	50.929	25.1
13	6	0	0	1.76650	51.706	13.1
14	6	2	0	1.67580	54.730	2.2
15	5	3	3	1.61630	56.925	3.1

Stick Pattern

Intensity [%]

Ref. Pattern: Chromium Iron Carbide, 01-078-1502



D-8 PDF CARD 00-002-1267

Name and formula

Reference code: 01-075-8279

Compound name: Iron Molybdenum Carbide

Empirical formula: $C_6Fe_{21}Mo_2$

Chemical formula: $Fe_{21}Mo_2C_6$

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic

Space group: Fm-3m

Space group number: 225

a (Å): 10.7650

b (Å): 10.7650

c (Å): 10.7650

Alpha (°): 90.0000

Beta (°): 90.0000

Gamma (°): 90.0000

Volume of cell (10^{-6} pm^3): 1247.50

Z: 4.00

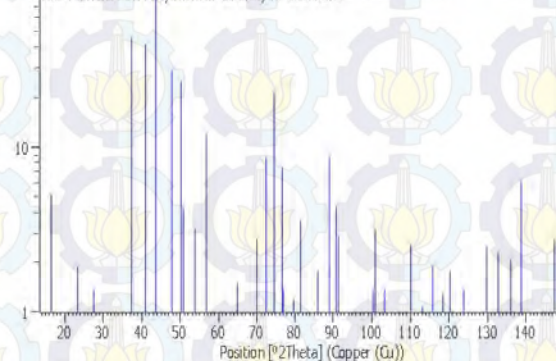
Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	6.21520	14.239	0.1
2	2	0	0	5.38250	16.456	5.2
3	2	2	0	3.80600	23.354	1.9
4	3	1	1	3.24580	27.457	1.4
5	2	2	2	3.10760	28.704	0.3
6	4	0	0	2.69120	33.265	0.3
7	3	3	1	2.46970	36.348	0.2
8	4	2	0	2.40710	37.327	46.1
9	4	2	2	2.19740	41.042	42.0
10	5	1	1	2.07170	43.656	100.0
11	4	4	0	1.90300	47.755	29.1
12	5	3	1	1.81960	50.091	25.1
13	6	0	0	1.79420	50.850	4.3
14	6	2	0	1.70210	53.816	3.2
15	5	3	3	1.64160	55.970	0.8
16	6	2	2	1.62290	56.672	12.2

Stick Pattern

Intensity [%]

Ref. Pattern: Iron Molybdenum Carbide, 01-075-8279



BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Hafidh Frian Perdana yang dilahirkan di Lumajang pada tanggal 5 Oktober 1994. Penulis pernah menjalankan pendidikan formal di SDN Tempeh Lor 01, SMP N 1 Tempeh, dan SMA N 2 Lumajang. Penulis merupakan mahasiswa aktif Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS tahun masuk 2012.

Selama menjalankan pendidikan di kampus ITS Surabaya, penulis berpartisipasi aktif dalam organisasi mahasiswa Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS sebagai Staf Material Techno Club Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi (HMMT) FTI-ITS. Selain itu penulis juga aktif dalam aktifitas akademik Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) Penelitian bidang Polimer dan PKM Gagasan Tertulis bidang penataan kota.

Alamat penulis saat ini adalah Jalan Imam Bonjol RT 01 / RW 03 Dusun Tulusrejo II, Tempeh Lor, Tempeh, Lumajang. Nomor telepon yang dapat dihubungi adalah 089664847668 atau alamat email hafidhfrian@gmail.com.

